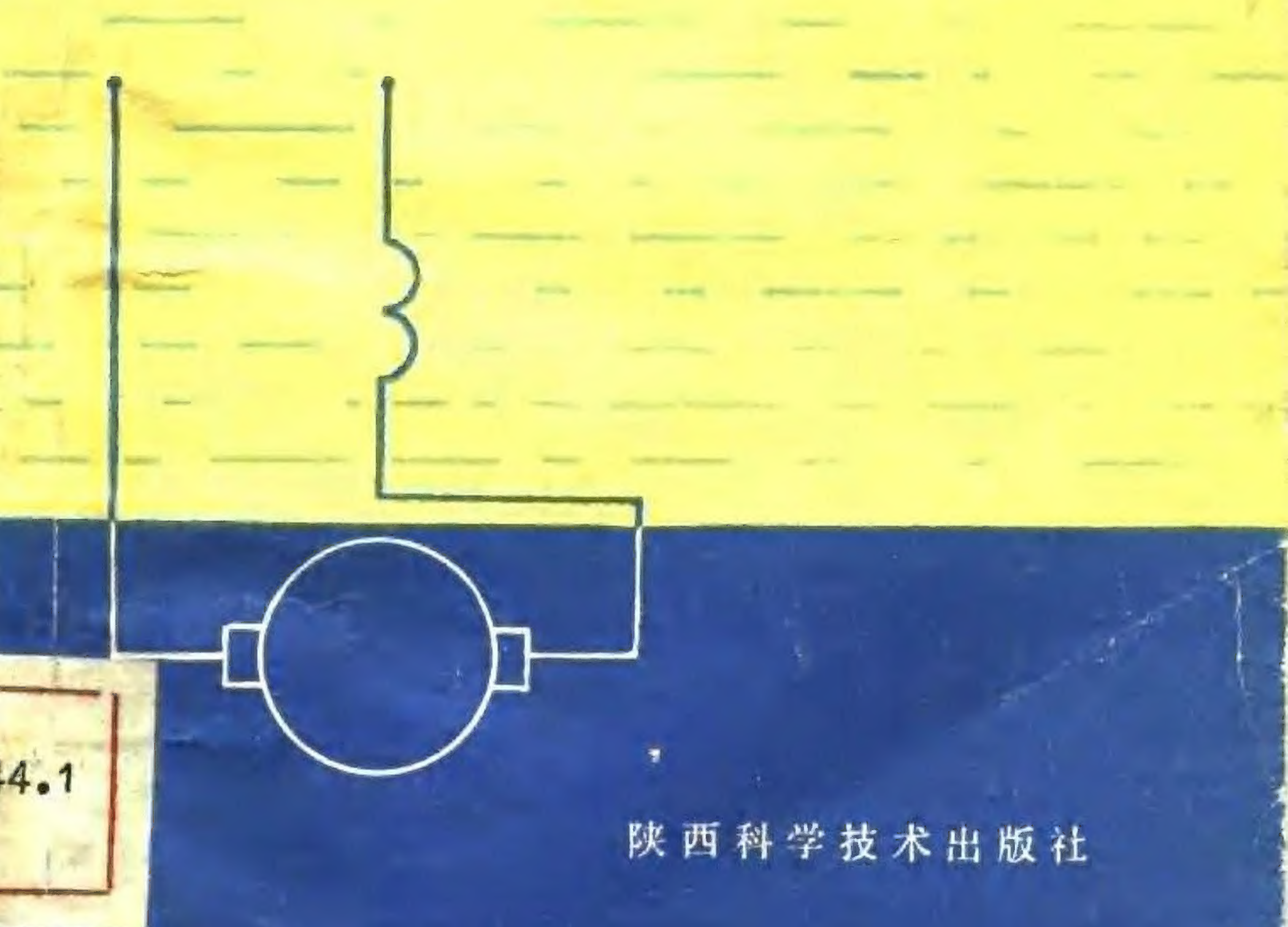
单相串激电动机

汪 国 樑



陕西科学技术出版社

前　言

单相串激电动机是工业中普遍采用的电机之一。它转速高、体积小、重量轻、调速方便，所以大量地使用于小型车床、化工、医疗等部门。尤其在电动工具行业中，应用更为广泛。目前我国年产电动工具数百万台，其中大多数都以单相串激电动机作为动力头。此外，大量生活设备，如缝纫机、电冰箱和绞肉机等，也往往选用单相串激电动机来带动。因此，随着国民经济的发展及人民生活的提高，单相串激电动机将有日益广泛的应用前景。

虽然我国生产单相串激电动机已有较长的历史，但有关这方面的资料至今仍比较分散，没有一本完整的书籍。本书从原理、性能、结构、简单计算以及使用维修等方面，对单相串激电动机进行了比较全面的阐述。在书后的附录部分，收集了国内生产的单相串激电动机的有关技术资料，可供从事这方面的工作人员参考使用。

在编写过程中，西安交通大学肖耀富同志、西安电机厂董伯祥同志提供了不少原始资料。广州电气科学研究所林道隆同志、青海电动工具厂崔杜武同志、上海微电机厂仲秋翎同志、本溪微电机厂赫崇芝同志、西安市建二公司马忠顺同志、西安电器开关厂张振芳同志等，在审阅书稿的过程中，提供了不少宝贵意见，在此一并表示感谢。

编　者

单相串激电动机
汪　国　梁
陕西科学技术出版社出版
陕西省新华书店发行　西安新华印刷厂印刷
开本 787×1092　1/32　印张 9　字数 180,000
1980年12月第1版　1980年12月第1次印刷
印数 1—1,700
统一书号：15202·7　定价：0.73元

目　　录

第一章　串激电动机的工作原理

1—1　直流串激电动机的工作原理

我们的主要目的是研究交流串激电动机，但在研究交流串激电动机以前，我们先来分析一下直流串激电动机的工作原理。这是因为：

1.串激电动机在许多情况下是设计成交直流两用的。即同一台串激电动机既可在交流电源下工作，也可以在直流电源下工作，要求在两种情况下，运行特性相似。例如电动工具用串激电动机往往设计成交直流两用的。因此在我们研究交流串激电动机工作原理时，也应分析一下这台串激电动机在直流电源下的工作情况。

2.串激电动机在直流电源下的工作情况比较简单，分析起来比较方便，通过直流串激电动机的分析，掌握了串激电动机的基本特性以后，再来分析交流串激电动机就比较易于接受了。

图1—1(a)是直流串激电动机工作原理的示意图。这是一个两极电机，在磁极上套有激磁绕组，它的功用是产生磁通。磁通的方向可以根据右手定则来决定。在图中所表示的电流方向情况下，磁通的方向是自下而上的。即对下面一个磁极而言，它的磁通是从磁极流出来的，这样的磁极我们称它为北极，用英文字母N来表示。而对上面一个磁极来

说，它的磁通方向是流进磁极的，这样的磁极我们称它为南极，用英文字母 S来表示。

两个磁极之间是转子，有时也称为电枢。它的铁心部分是由电工钢片迭成的圆环。一根导线沿着圆环内外表面环绕前进，构成一个闭路，这就是电枢绕组。两个磁极中间的平分线称为几何中心线，在几何中心线上放有一对电刷A 和 B。串激电动机的激磁绕组与电枢绕组是串联接法，即激磁绕组与电枢绕组流过的是同一个电流。在图 1 — 1 (a) 所表示的转子导体缠绕方向下，当电流由电刷 A 流入电枢绕组时，N 极下转子导体电流方向是流进纸面，我们用符号⊕来表示；而S 极下转子导体电流方向是流出纸面，我们用符号⊙来表示。转子上的载流导体与定子磁场相作用，便产生了电磁

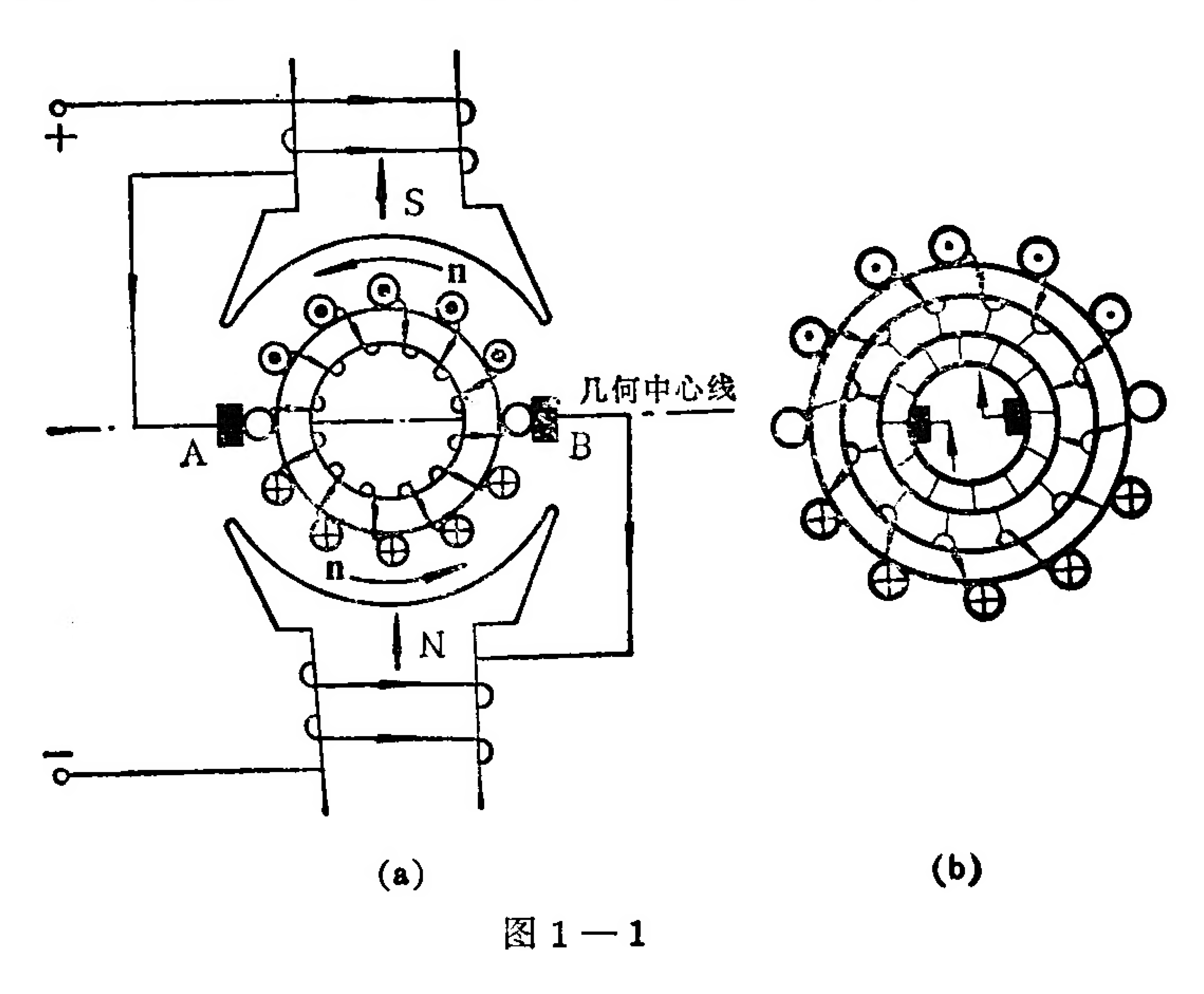


图 1 — 1

力。电磁力的方向可以根据电动机左手定则来决定。显然在图1—1(a)所表示的情况下，转子导体所产生的电磁力的方向是逆时针的。在电磁力的作用下转子便旋转起来，形成了一台串激直流电动机。

图1—1(a)是串激直流电动机工作原理示意图，这种结构型式的直流电动机虽然可以旋转，但工作时，导体与电刷摩擦，极易损坏。为了改进这个缺点，必须采用换向器。图1—1(b)中心部位就是换向器，它由互相绝缘的12个铜片所组成。12个铜片分别与12个导体元件相联接。电刷A、B则放在换向器上，电流从电刷流到换向器，再流入电枢绕组中。这样，借换向器之助，避免了导体与电刷的直接磨损，而电流却仍能同图1—1(a)一样，流入电枢导体中。

根据上面所讲的工作原理，对串激电动机可以得到以下几个重要的结论：

1.一般情况下，电刷都放置在几何中心线上（图1—1），因为如果电刷的位置偏离几何中心线（图1—2），在相同电流情况下，电动机所产生的转矩可能减少。下面我们来解释这个道理。在图1—1(a)中电刷A和B是电枢导体电流方向改变的分界线。电刷A、B的上方，转子导体电流是同一个方向，都是流出纸面。电刷A、B的下方，转子导体电流也是同一个方向，都是流入纸面。由于电刷是电枢导体电流方向改变的分界线，在图1—2中，当电刷位置顺时针转动一个

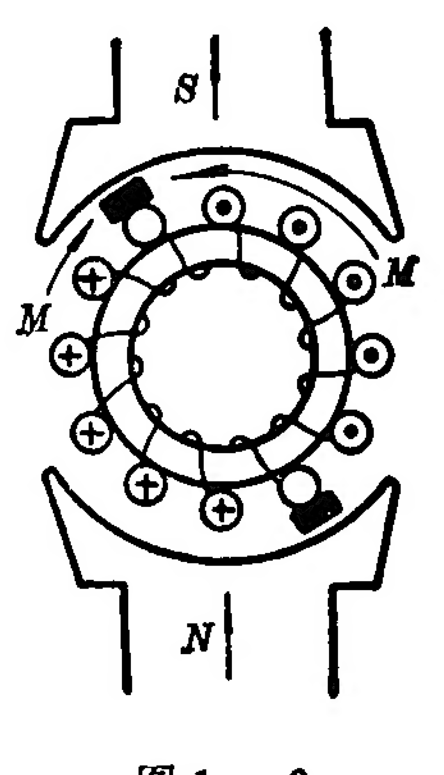


图1—2

角度后，电流改变方向的分界线也要顺时针转过一个角度。这就使得同一极面下，转子导体电流 方 向 不 一致。例如在S 极下，大部分转子导体电流是流出纸面⊙，而有少部分导体电流则是流入纸面⊕。在同一个极面下，转子导体的电流方向相反，它们所产生的电磁力的方向也相反。例如，在 S极面下，根据电动机左手定则可以判断出，电流流出纸面的转子导体产生逆时针方向的电磁力，而电流流入纸面的转子导体则产生顺时针方向的电磁力。由于电磁力的方向相反，互相抵消一部分，而使总的电磁转矩减少。如果把电刷的位置移到磁极中心之下，则在同一极面下，一半导体电流流入纸面，另一半导体电流流出纸面，这两部分电流所产生的转矩大小相等方向相反，全部抵消，总的电磁转矩便为零，电机就再也转不起来了。因此一般情况下，为了在同样大小的电流下能产生最大的电磁转矩，电刷的位置都是放置在几何中心线上。当然，由于性能上的需要电刷的位置也会偏离几何中心线，这个现象我们将在第五章说明。

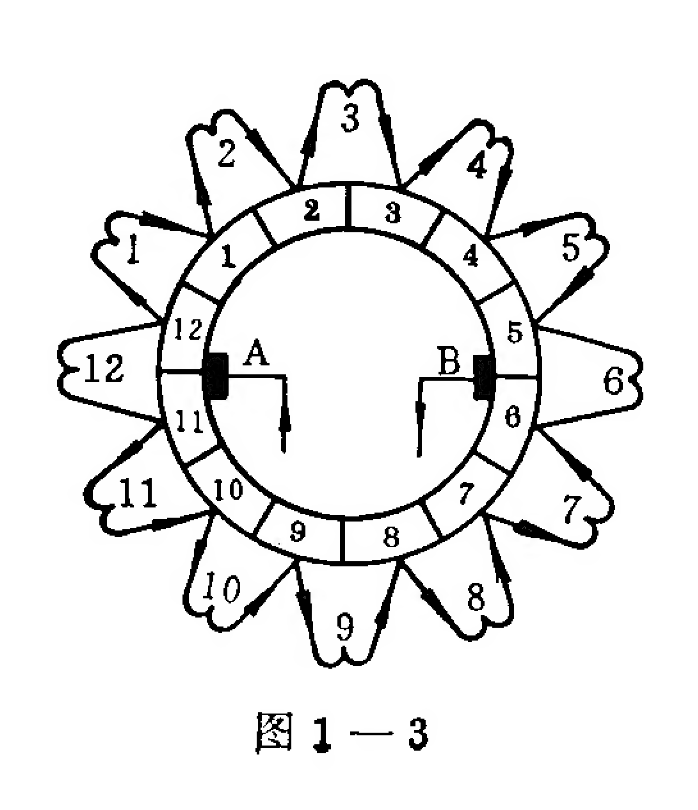


图 1 — 3

2. 在图 1 — 1 (a) 中我们可以清楚地看到，电流经电刷 A 流入转子后，分为两路：一路经过S 极面下的导体而流到电刷B，一路经过N极面下的导体而流到电刷 B，这两条支路通过电刷 A、B 并联起来，图 1 — 3 是它的示意图。

图 1 —1(a)是一个两极电机，转子只有两条支路，如果

是四极电机，那就不一定是两条支路了。不过一般小型串激电机都是两极的，转子也就只有两条支路。转子的两条并联支路与定子绕组互相串联，因而定子绕组的导体截面积必须比转子绕组的导体截面积大一倍。

3.在串激电机中，所有转子导体全部串联起来组成一条闭合回路。特别要强调指出，这条回路一定是闭合的，绝对不允许开路。这个闭合回路如果断开，对电机性能会带来重大影响。例如电磁转矩显著下降，电机带不动负载。这个现象可以通过图1—4来说明。在某一瞬间，假如断头的位置转到N极极面下，则N极面下这一条支路由于断开而使电流为零，当然也就不能产生转矩，因而使总的电磁转矩减少，电机出力下降。此外还会产生强烈火花，使电机不能运行，这个现象我们将在7—2节中进行详细分析。

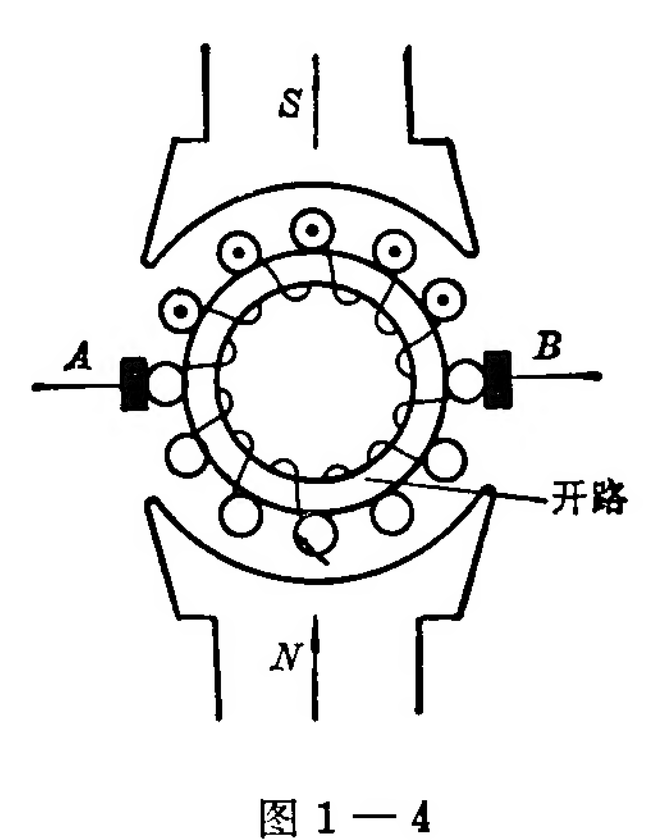


图1—4

1—2 交流串激电动机的工作原理

图1—5是交流串激电动机工作原理的示意图。

由于交流串激电动机的工作原理是建立在直流串激电动机基础之上的，因此，我们从直流串激电动机的工作原理开始进行分析。图1—5(a)是直流串激电动机工作原理的示意图，它是图1—1(a)的简化，两个图形中的磁通以及

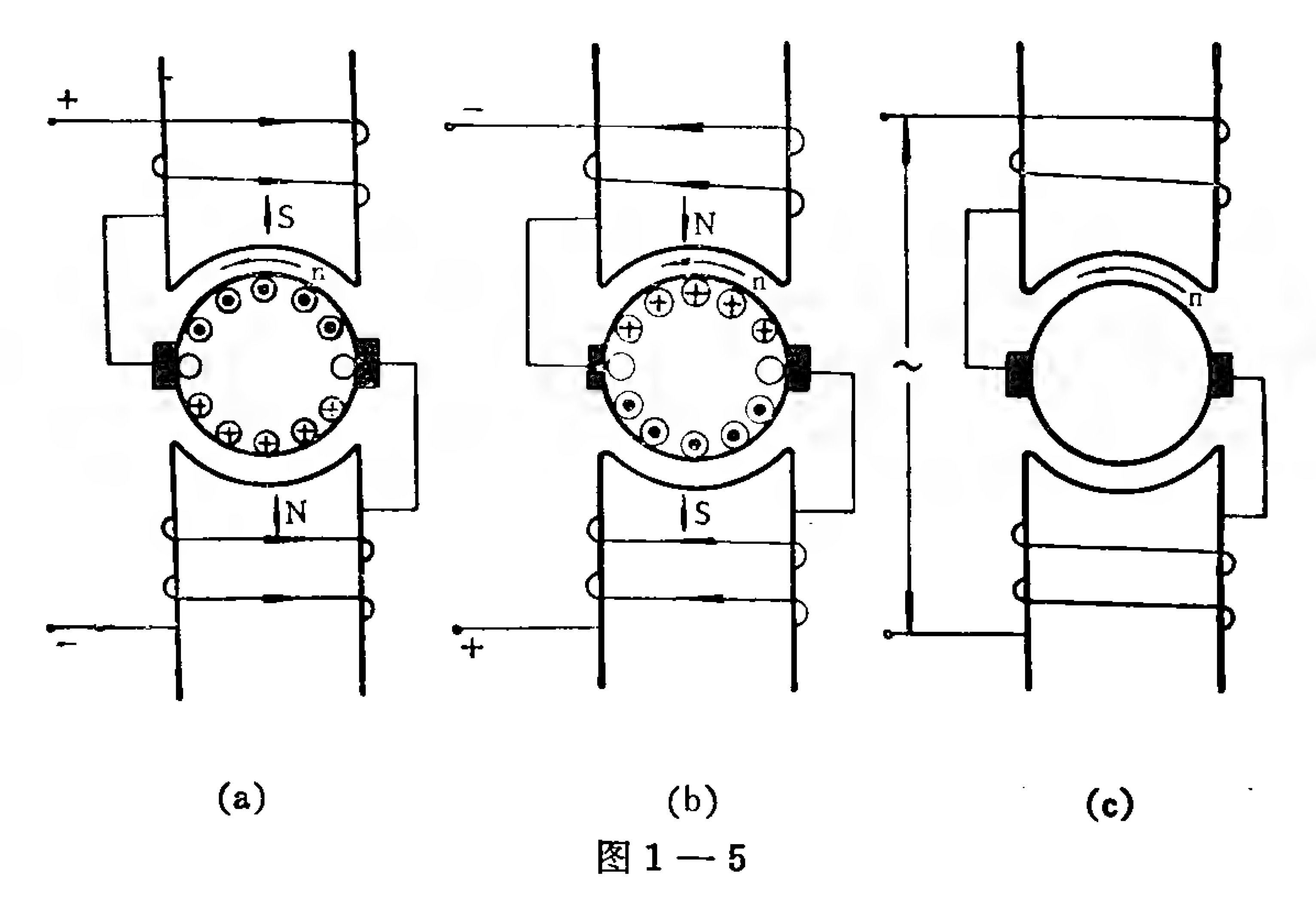


图 1 — 5

定、转子电流方向是一样的。根据图 1 — 5 (a) 所表示的磁通和电枢电流方向，根据电动机左手定则，可以决定出转子旋转方向是逆时针的。图 1 — 5 (b) 是同一台电机，唯一不同点是图 1 — 5 (b) 的电源极性已经反过来。由于是串激电机，定子电流及转子电流将同时改变方向，也就是说，定子磁通及电枢电流将同时改变方向，根据电动机左手定则可知，在磁通及电枢电流同时改变方向的情况下，转子转向不变，仍然为逆时针方向旋转。由此我们可以推论：一台直流串激电动机改接交流电压后，虽然电源极性在反复变化，但转子始终维持一恒定转向，因此也可以作为交流电动机运行，这就是单相交流串激电动机的工作原理。串激电动机若设计成在交、直流两种电源上都可以应用，也称为通用电动机。

根据上面的分析，我们可以看到交流串激电动机的工作原理与直流串激电动机的工作原理基本上是一样的，因此分析直流串激电动机得出的一些主要结论，如：电枢绕组应组成闭合回路，不能断开；电刷放在几何中心线上才能产生最大的电磁转矩；两极电机中电枢绕组是两路并联的等，也适用于交流串激电动机。

1—3 国产产品及其额定值

一、产品介绍

1.单相串激电动机

单相串激电动机，适用于要求体积小、转速高、或调速范围广的场所，例如小型车床、实验室、化工、医疗器械等。

U型及G型是单相串激电动机的老产品，目前仍然大批生产，它们的主要性能及技术数据详见附表—6及附表—8。转子绕组的联结方法详见附图—13至附图—25。同一种产品由不同工厂制造，其内部技术数据不尽相同。即使是由同一工厂制造，由于材料及工艺的变更，不同年代出厂的产品，其内部数据也可能会有变动。因此附表及附图所给出的数据，不是一成不变的，仅供修理串激电机时参考。

新系列单相串激电动机是G系列。它是根据1970年5月一机部颁布的JB1135—70G系列微型单相交流串激电动机部标准而生产的新系列标准产品，可代替目前一般使用的U型及G型电动机。

G系列电动机的主要性能详见附表—9。它是开启扇冷式，机壳由钢板拉制而成。功率有8、15、25、40、60、90、

120、180、250、370、550、750瓦共12种，转速分4000、6000、8000、12000转/分四个规格。由这12个容量等级及4个转速规格，组成38个不同品种的电机（附表一9）。这38个不同品种的电机分别安置在4个不同的机座号中，这4个机座号的具体代号是36、45、56、71。在G系列单相串激电机中，是用中心高来表示机座号的。例如机座号为36，就表示电机转轴中心到底脚平面的距离——即中心高为36毫米。每一个机座号，均有三种不同长度的铁心，用铁心代号1、2、3来表示。分析附表一9所列出的几个表格，我们可以得到下面几个性能上的主要特点。

（1）从附表一9中的第1个表格可以看出，同一个铁心，当电机转速提高时，它的功率将正比例的增大。例如：机座代号为45、长度代号为2这一种铁心，在转速为4000转/分时，额定功率为60瓦；转速为6000转/分时，额定功率为90瓦；转速为8000转/分时，额定功率为120瓦；转速为12000转/分时，额定功率为180瓦。即在铁心尺寸不变的情况下，电机的额定功率正比于它的转速。这是各种电机所共同具有的规律，单相串激电动机当然也不例外。

（2）从附表一9中的第2个表格可以看出，电机的功率因数也是正比于转速的。同一个容量的电机，转速越高，它的功率因数也越高。以25瓦电机为例，当转速为4000转/分时，功率因数为0.81；转速为6000转/分时，功率因数为0.86；转速为8000转/分时，功率因数为0.88。转速越高，它的功率因数也越高，这是单相串激电动机性能上一个很大的特点。

（3）从附表一9中的第2个表格还可以看到，电机的

效率是正比于功率的。电机的功率越大，它的效率也越高。以 4000 转/分这一种转速的电机为例，功率为 8 瓦时，它的效率为 0.32；功率为 90 瓦时，效率为 0.56；功率为 750 瓦时，效率为0.67。电机的功率越大，它的效率越高，这也是各种电机所共同具有的规律，单相串激电动机当然也不例外。此外，同一种功率的电机，它的效率还正比于转速。以25瓦这个电机为例，4000 转/分时，效率为 0.44；6000 转/分时，效率为0.45；8000转/分时，效率为0.46。

（4）对一般的异步电动机而言，它的起动电流约为额定电流的4.5—7.5倍，起动转矩约为额定转矩的 1 — 2 倍。从附表— 9 中的第 3 、4 表格可以看出，同异步电机相比，单相串激电机具有较小的起动电流和较大的起动转矩。这是它性能上一个很可贵的特点，常用在起动比较困难的地方。

U型、G型及 G 系列电机，主要是为交流电源设计的，当用于直流电源时，输出功率及额定转速均会有所提高。此外还有专门设计成交、直流两用的 SU 型串激电动机，这种型号的电机在结构上和交流串激电机类似，但设计成无论在交流或直流电压下运行，都具有相同的额定转速。SU 型串激电机的技术数据及转子绕组图形详见附表—7 及附图—19。

2.电动工具用交直流两用串激电动机

随着国民经济的发展，电动工具的应用愈来愈普遍，大多数电动工具都是采用交直流两用串激电动机来做为它的动力头，因此，我们对电动工具用交直流两用串激电动机做一简单介绍。

附表—1是老系列——即 J1Z 系列电钻的技术数据，附

图—1至附图—8是对应于这种电钻的转子绕组接线图，1966年曾对电动工具用串激电动机进行了统一设计，发展成为DT系列电动工具用串激电动机，附表——2是它的技术数据。

随着电动工具的发展，为了尽可能以最少量的通用零部件派生出更多的产品，以提高劳动生产率，1974年又对电动工具用交直流两用串激电动机重新进行了统一设计。它的主要性能及电磁数据详见附表——3。从表中可以看出，三种类型的冲片制造出七种规格的电机，而绝大多数电动工具都将以这七种电机来做为它的动力头，通用性大大加强，便于制造、维护和修理。以电钻及砂轮机为例，它们选用电机的范围如附表——4所示。

二、额定值

制造工厂在设计电机时，根据所选用的导体截面、铁心尺寸、绝缘材料以及冷却方式等条件，规定了电机正常运行时的工作状态，例如它能流过多大的电流及能承受多大的电压，等等。这些在正常运行时所能承担的电流和电压等数值，便称为额定值。串激电机的额定值有额定电压、额定电流、额定功率、额定转速、额定温升等等，与一般电机大同小异，下面我们只对具有特点的几个额定值，进行讨论：

1.额定功率

一般用途的串激电机都是作为电动机运行，因此名牌上所标明的额定功率，同其它电动机一样，都是指它转轴上所输出的机械功率。

但电动工具则不同，电动工具的名牌上有时也标明电动机的额定功率。但电动工具名牌上的额定功率不是指电动机

所输出的机械功率，而是指电动机输入的电功率。电动工具名牌上为什么与一般电动机标法不一样，这是有它道理的。因为一般的电动机带动什么负载，制造工厂无法事先知道，在名牌上标明它所能输出的机械功率，可以做为用户在选配负载时的参考。而电动工具用串激电动机情况则不同，此时，电动机已是整个电动工具中的一个部件，负载已经固定，不存在负载选配的问题。因此，把转子所能输出的机械功率标明在名牌上已经意义不大了。而把输入的电功率作为额定值标明在名牌上，可以说明耗电量的大小，这也是用户所关心的主要性能之一。

2.额定转速

同其它电动机一样，对一般串激电动机而言，名牌上所标明的额定转速是指电机的满载转速。从2—3节的分析我们将会知道，串激电动机的空载转速远比满载转速高，因此一般情况下，在额定电压时，串激电动机不允许空载，否则，转速将上升到危险的高值，电机极易因此损坏。当然，对于几十瓦以下的小容量串激电动机，由于本身的损耗相对较大，相当于电动机已经带上了一个负载，可以允许在额定电压下空载运行。

对电动工具而言，名牌上标明的转速，可能是满载转速也可能是空载转速，视产品而异，这一点我们在看电动工具名牌时必须注意。电动工具往往是断续使用的，电动机经常在空载下运行，为了防止转速过高，噪音过大，空载转速应加以限制；尤其是砂磨工具，因受砂轮安全线速度的限制，空载转速更不能过高。所以电机的空载转速n_0与满载转速n_N之间，在设计时加以控制。例如74年电动工具用串激电动机

统一设计时，就将n_0控制在$\frac{1}{0.6}n_N$左右。

3.额定温升

串激电动机采用的是E级绝缘。根据标准，E级绝缘的温升是75℃，一般电机均遵守这个规定，但电动工具用串激电动机却是个例外。当电动工具在额定状态下连续运行，采用E级绝缘时的绕组温升可允许到85℃。这是因为根据JB 794—66“电机、电器和变压器用绝缘材料耐热等级”的规定，E级绝缘材料的极限温度为120℃，环境空气温度规定为40℃，所以E级绝缘材料最热点处的温升为80℃。而绕组各部位的温度分布是不均匀的，最热点的温度与平均温度相差一般约为5℃左右，所以E级绝缘的平均温升定为75℃。这是考虑到产品的经济使用寿命而作出的规定。对一般电机而言，在此温度下正常运行，使用期限约为15—20年左右，如果电机在比较高的温度下运行，绝缘材料会加速老化而损坏，电机的使用年限就会大为缩短。而电动工具的损坏主要是由于机械、振动、冲击、制动等因素所引起，它的使用寿命较短，一般在断续使用条件下，使用时间累计相加有1000—1500小时已较满意，此指标远低于通用电机的使用寿命，因此，适当提高绕组温升，从绝缘老化的角度来看是完全允许的。

第二章　直流串激电动机的性能

2—1　反电势及电势平衡方程式

一、电枢绕组中的反电势

如果我们把工作原理图图1—1简化，可以得到图2—1。在图1—1中，上面是S极下面是N极。在图2—1中，也是上面为S极下面为N极。在图1—1中，S极下转子导体电流是流出纸面的，N极下转子导体电流是流入纸面的。在图2—1中，也是S极下电流为流出纸面的，N极下电流为流入纸面的。但为了图形的清晰，在图2—1中，N极及S极下只分别画出了一根导体。

转子上的载流导体与定子磁场作用，便产生转矩，使转子旋转。在图2—1所表示的电流及磁场方向下，根据电动机左手定则来判断，转子旋转方向是逆时针的。

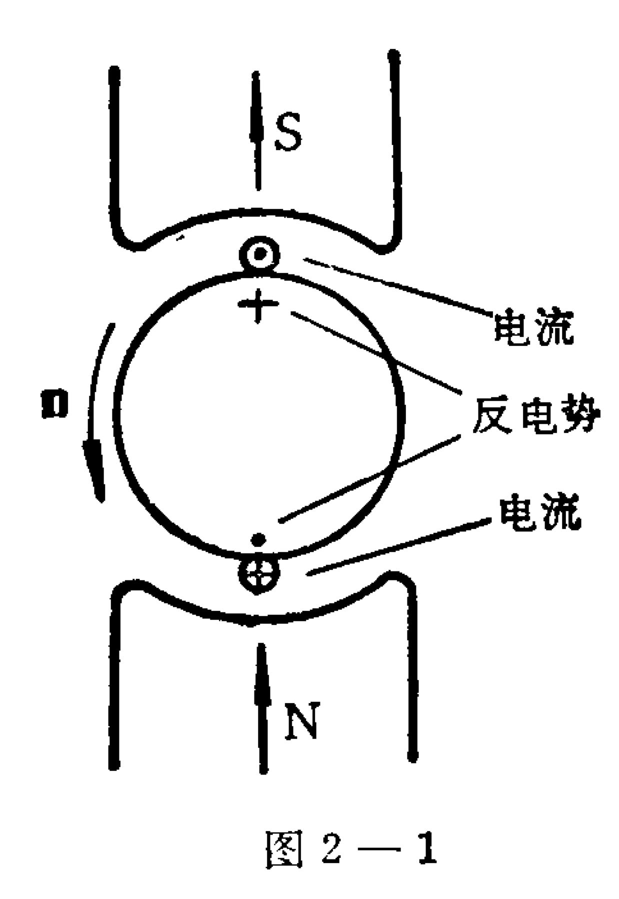


图2—1

转子旋转以后，导体将切割定子磁场而产生感应电势。在图2—1所表示的磁场及旋转方向下，根据发电机右手定则判断，S极下转子导体的感

应电势方向应是流入纸面，以符号“+”来表示。N极下转子导体感应电势方向则应是流出纸面，以符号“·”来表示。因此，从图2—1可以清楚地看到：转子导体通入的电流，与转子导体切割定子磁场而产生的感应电势，两者方向正好相反。在电动机中，由于感应电势有阻止电流流入电枢绕组的作用，因此称它为反电势。

反电势是一个很重要的物理量，对电机性能有重大影响，为了说清楚这方面的问题，首先要看一下反电势的计算公式。

二、反电势计算公式

反电势是由于转子导体切割定子磁场而产生的，根据电工知识我们知道，每根导体的感应电势 e 应为

$$e = Blv \qquad 2—1$$

式2—1告诉我们，每根导体的感应电势 e 正比于空气隙内的磁通密度 B，也就是正比于电机内的每极磁通 ϕ。式2—1还告诉我们，每根导体的感应电势 e 还正比于导体切割磁通的速度 v，也就是正比于转子的转速 n。所以在直流电机中，每根导体的感应电势 e 是正比于定子的每极磁通 ϕ 及转子转速 n 的。即

$$e \xrightarrow{\text{正比于}} \phi n \qquad 2—2$$

当然，如果转子绕组的总导体数 N 越多，转子绕组总的反电势 E 也会越大，因此，

$$E \xrightarrow{\text{正比于}} Ne \qquad 2—3$$

即

$$E \xrightarrow{\text{正比于}} N\phi n \qquad 2—4$$

或 $$E=\frac{10^{-8}}{60}N\phi n \qquad 2-5$$

式中：E——转子绕组的反电势，伏；

N——转子绕组的导线数；

n——转子转速，转/分；

$\frac{10^{-8}}{60}$——单位转换系数。如果ϕ的单位采用韦伯，n单位采用转/秒，则式2—5中的$\frac{10^{-8}}{60}$便应用1来代替。

ϕ——定子的每极磁通，马克斯韦尔。可用下式计算

$$\phi=B_\delta lb \qquad 2-6$$

式中：B_δ——气隙磁密，高斯；

l——定子铁心长度，厘米；

b——定子极弧宽度（图2—2），厘米。

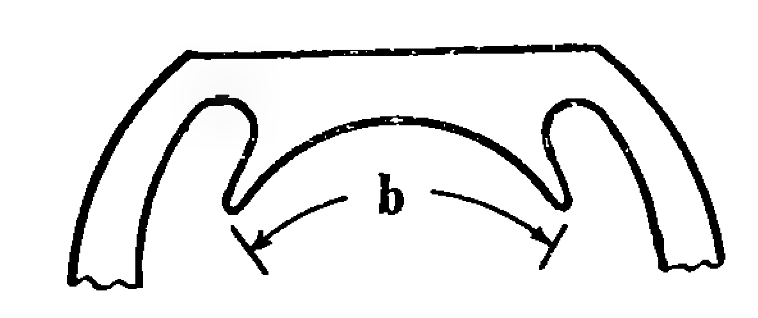


图2—2

式2—5所表示的反电势计算公式，只适用于两极电机。小容量串激电机绝大多数都是两极的，因此可以直接采用式2—5来计算转子绕组的反电势。如果是多极电机，则反电势计算公式应为

$$E=\frac{10^{-8}}{60}N\phi n\frac{p}{a} \qquad 2-7$$

式中：p——定子磁极对数，a——转子绕组并联支路对数。

式中2—7是一般化的反电势计算公式，它的证明过程可参见一般直流电机教科书。对两极电机而言，定子磁极对

数p＝1，转子绕组并联支路对数a＝1（见1—1节），将此关系代入式2—7，即可得到式2—5所表示的两极电极反电势计算公式。

三、电势平衡方程式

图2—3是串激电动机的示意图。当电源电压U施加到电动机两端以后，便有电流I流入到电动机绕组内。电流I流入到电动机绕组要遇到两个阻力。其一是上面所讲到的反电势E，根据以上分析我们知道，反电势总是反对电流流入电机内部的。其二是电阻压降IR，电阻越大，电流流入越困难，因此电阻压降IR也是反对电流流入电机绕组的。电源电压U倾向于使电流流入电机绕组，而电阻压降IR及反电势E则反对电流流入电机绕组，稳定运行时，两者应该相等，即

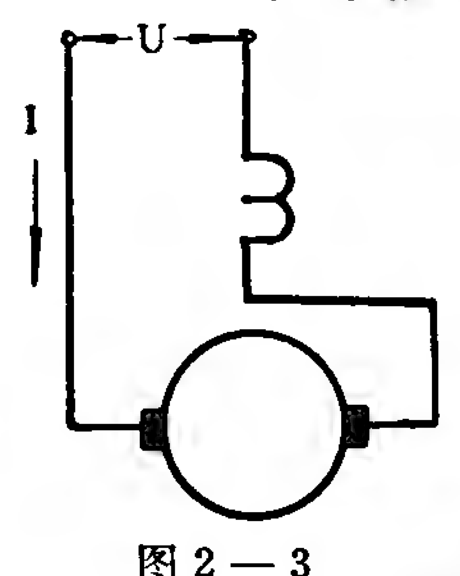


图2—3

$$U = E + IR \qquad 2—8$$

式中：U——电源电压，伏；

E——电枢绕组的反电势，伏；

I——电流，安；

R——电机内部的总电阻，欧姆。

式2—8就是串激电机的电势平衡方程式，许多重要的性能将由它来决定。

2—2　直流串激电动机的电磁转矩

从工作原理图（图1—1）可以知道，电源输入的电能

之所以能变成转子上所输出的机械能，是通过转子上所产生的电磁力的作用而实现的。由电磁力产生转矩，因此转矩是电机中能量形态变换的基础，是一个相当重要的物理量。它可用下面的方法进行推导。

电机产生的电磁转矩正比于导体产生的电磁力，导体所产生的电磁力越大，电机所产生的电磁转矩也越大。此外，由于转子上每根导体均与定子磁通相作用而产生电磁力，所以转子上的导体数越多，转子所产生的总电磁力越大，电机的电磁转矩也会越大。既然电机的电磁转矩M既正比于每根导体所产生的电磁力 f，又正比于转子上的总导体数 N，所以

$$M \xrightarrow{\text{正比于}} Nf \qquad 2-9$$

根据电工知识我们知道：每根导体所产生的电磁力 f 的计算公式应为

$$f = Bli \qquad 2-10$$

这个公式告诉我们，每根导体产生的电磁力 f 正比于下面两个物理量，即：（1）正比于空气隙内的磁通密度 B，也就是正比于电机内的每极磁通 ϕ。（2）正比于每根导体的电流 i，也就是正比于电枢绕组的总电流 I。因此，在直流电机中，每根导体所产生的电磁力 f 是正比于定子的每极磁通 ϕ 及转子电流 I 的。即：

$$f \xrightarrow{\text{正比于}} \phi I \qquad 2-11$$

从式 2—9 及 2—11可以得到：

$$M \xrightarrow{\text{正比于}} N\phi I, \qquad 2-12$$

或

$$M=\frac{10^{-3}}{61.6}N\phi I. \qquad 2-13$$

式中：M——电磁转矩，克—厘米；

N——转子绕组的导体数；

I——输入转子的电流，安；

ϕ——定子每极磁通，马克斯韦尔，可用式2—6计算；

$\frac{10^{-3}}{61.6}$——常数。

式2—13所表示的电磁转矩计算公式，只适用于两极电机。小容量串激电动机绝大多数是两极的，因此可以直接应用式2—13来计算它的电磁转矩。如果是多极电机，则电磁转矩公式应为

$$M=\frac{10^{-3}}{61.1}N\phi I\frac{p}{a} \qquad 2-14$$

式2—14是一般化的电磁转矩计算公式，它的证明过程可参见一般直流电机教科书。对两极电机而言，定子磁极对数$p=1$，转子绕组并联支路对数$a=1$，将此关系代入式2—14即可得到式2—13所表示的两极电机电磁转矩公式。

2—3　直流串激电动机的基本性能

一、三个基本公式

直流串激电动机的性能由下面三个基本公式所决定，即：

（1）电势平衡方程式（式2—8）

$$U = E + IR \qquad 2-15$$

（2）反电势计算公式（式2—5）

$$E = k_e \phi n \qquad 2-16$$

式中：

$$k_e = \frac{10^{-8}}{60} N$$

（3）电磁转矩公式（式2—13）

$$M = k_M I \phi \qquad 2-17$$

式中： $k_M = \frac{10^{-8}}{61.6} N$

下面我们就利用这三个公式来分析串激电动机的一些基本性能。

二、起动性能

表示起动性能的两个主要指标是起动电流 I_{st} 及起动转矩 M_{st}，分述如下。

1.起动电流

任何电动机的起动电流都比正常工作时的电流大，串激电动机当然也不例外。起动电流比较大的原因，可以通过式2—15来解释。电源电压U倾向于将电流送入电机绕组，而反电势E及电阻压降IR则反对电流流入电机绕组。在刚起动的那一瞬间，电机转速 $n = 0$，转子导体还没有切割定子磁场，转子绕组的反电势 $E = 0$（式2—16），因此只有电阻压降一个因素来限止电流流入电机绕组，所以起动电流就比较大。如果将 $E = 0$ 代入式2—15，可以得到起动时的电势平衡方程式

$$U = IR \qquad 2-18$$

从式2—18便可以得到起动电流的计算公式

$$I_{st}=\frac{U}{R} \qquad 2—19$$

电源电压U是一个固定不变的数值，所以起动电流的大小，是由电机的电阻来决定的。电阻小，起动电流就大，电阻大，起动电流就小。容量大的电机，导线比较粗，电阻比较小，起动电流很大，能够达到额定电流的10～20倍。这样大的起动电流往往带来许多不良的后果，例如使换向器上产生强烈的火花。因此，起动时必须降低电源电压，或在电机回路内串联附加电阻，以限制起动电流。对我们现在所研究的小容量串激电动机而言，则无此必要。因为小容量电机导线比较细，电阻比较大，电机本身的电阻就可以限止起动电流。同时小容量电机，转子的转动惯量较小，起动时速度上升很快，起动过程很快便可结束，起动电流略为大点也不至于带来不良的后果。

2.起动转矩

在具有同样大小起动电流的条件下，串激电动机能够比其它类型的电动机产生较大的起动转矩。这是因为电磁转矩是由转子电流与定子磁通相作用而产生的（式2—17），转子电流及定子磁通越大，电磁转矩也越大。而在串激电动机中，激磁绕组是与电枢绕组相串联的，比较大的起动电流既流过电枢绕组，也流过激磁绕组。因此起动时，定子绕组能产生较大的磁通。既然起动时，转子绕组有较大的电流，定子绕组又能产生较大的磁通，所以就能产生较大的起动转矩。

串激电动机能够产生较大的起动转矩，这是它性能上一个非常可贵的特点，因此起动比较困难的地方，常用串激电

动机。例如现在生产的UQ型高起动转矩电动机，具有大的起动转矩，以及比其它类型电机小得多的外型尺寸，适宜在需要大的起动转矩而瞬时断续运行的机械上作传动之用，如用于操纵控制开关等。

三、串激电动机的转速

我们知道，异步电动机的转速是由电机的磁极对数来决定的，两极电机旋转磁场的转速是3000转/分，四极电机旋转磁场的转速是1500转/分，等等。异步电机的磁极数最少是两极，因此旋转磁场的最高转速是3000转/分。一般情况下，要使异步电动机的转速高于3000转/分是不可能的。那么，串激电动机的转速是由什么因素来决定的呢？

如果将式2—16代入式2—15，可以得到，

$$U = k_e n\phi + IR \qquad 2—20$$

从式2—20便可以得到转速的计算公式

$$n = \frac{U - IR}{k_e\phi} \qquad 2—21$$

式中：U为电源电压，一般情况下，它是一个固定不变的数量。ϕ为定子每极磁通，从计算公式（式2—6）可以看出，在定子尺寸已定的情况下，ϕ的变化范围不大。而且，为使材料得到充分的利用，电机产生尽可能大的电磁转矩，ϕ尽可能的取较大值。R为电机电阻，也是一个变化范围不大的数量。因此在设计电机时，影响电机转速的决定性因素是k_e。从式2—16可以看出，在设计时如果转子导体数N取得少，k_e值也就小，电机转速就会高（式2—21）。在设计时，如果转子导体数N取得大，k_e值也就大，电动机转速就会低。所以，串激电动机的转速是由转子的导体数来决定的，

转子导体数少，电机转速就高，转子导体数多，电机转速就低。这个结论，既适用直流串激电动机，也适用于交流串激电动机。

为什么转子导体数的多少会影响电机的转速呢？这是因为在铁心尺寸已定的情况下，定子每极磁通ϕ的数值也就基本定下来了。转子导体数少，如果电机的转速又不高，转子绕组的反电势E就小（式2—16），就会有较大的电流流入电机，以产生较大的电磁转矩（式2—17），迫使电机的转速上升。

如前所述，异步电动机的转速不可能大于3000转/分，但对串激电动机而言，却可以用减少转子导体数的方法，使它的转速大于3000转/分。目前生产的G系列单相串激电动机的转速为4000—12000转/分，1974年设计的电动工具用交直流两用串激电动机的转速为9900—14300转/分。串激电动机能够用减少转子导体数的方法，得到比较高的转速，这又是它性能上另一个可贵的优点，也是在电动工具中能够得到广泛应用的原因之一。因为根据电机设计的理论，任何电机，当然也包括串激电动机在内，在铁心尺寸一定的条件下，它所能产生的功率是正比于转速的。转速越高，产生的功率也越大。这个道理很简单，以串激电动机为例来看，转速越高，转子导体数越少，在铁心尺寸已定的条件下，槽的面积就空下来了，就允许采用较粗的导线，就可以流过较大的电流，当然也就可以产生较大的功率了。从另一个角度来看，在功率一定的条件下，电机转速越高，电机的体积重量当然也就会越小了。

在需要高转速的地方，可以选用串激电动机，例如牙科

用钻头就是用串激电动机来带动的。同样在需要体积小重量轻的地方，也可以选用串激电动机，例如手电钻也是用串激电动机来带动的。电动机的转速设计成10000—14000转/分左右，以减轻电机的体积和重量，但钻头最低的转速只有250转/分（附表—4），甚至更低，然后再用齿轮减速的方法得到所需要的低转速。

四、串激电动机的机械特性

当负载转矩M变化的时候，串激电动机的转速n如何变化呢？描写这两者关系的曲线称为机械特性。从串激电动机的接线图（图2—3）可以看出，激磁电流就是电枢电流，因此气隙磁通是随电枢电流而变化的，这是串激电动机的主要特点，它决定了串激电动机机械特性的主要性质。从式2—17可以看出，转矩增加的时候，电枢电流必定增加。在串激电动机中，电枢电流增加以后，转速便急剧的下降，这是因为：（1）从式2—21可以看出，电枢电流增加时，电阻压降IR增加，分子减小，因而转速降低。（2）随着电枢电流的增加，主磁通Φ大量增加，分母变大，因而转速更快的下降。因此，串激电动机机械特性的特点是：随着转矩的增加，电流增加，转速急剧下降，形成图2—4所表示的曲线形状。具有这种性质的特性，称为软特性。串激电动机具有较软的机械特

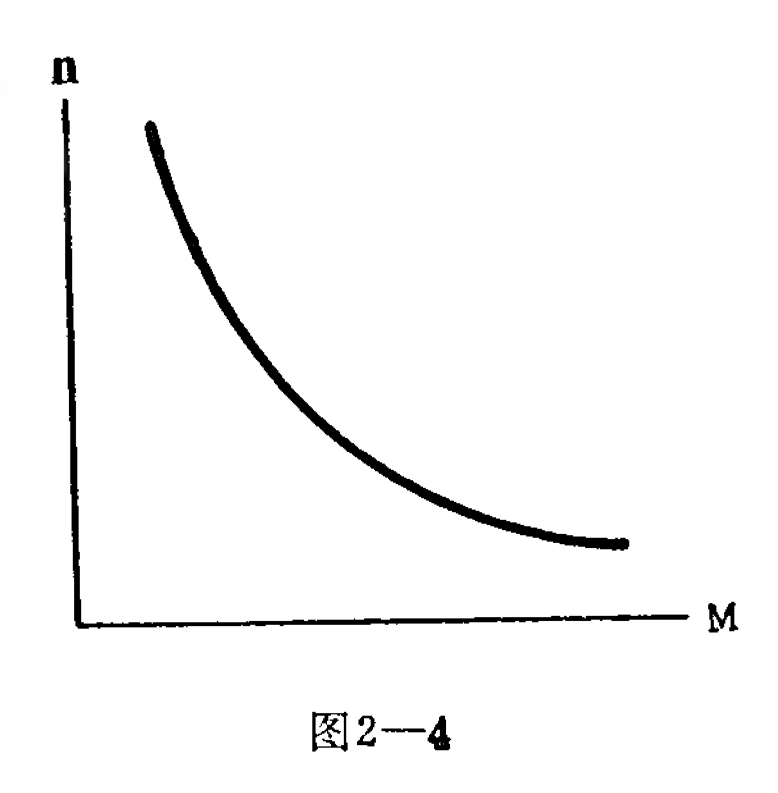


图2—4

性，这就使得它的性能具有下面的两个特点：

1. 我们知道，电动机的输出功率 P_2 为

$$P_2 = \frac{1}{975} Mn \text{（千瓦）} \qquad 2-22$$

式中：M——转矩，公斤——米；

n——转速，转/分。

在串激电动机中，由于转矩M增加时，转速 n 减少，故功率 P_2 增加较慢，因此串激电动机不容易因为负载转矩增大而过载，常用在负载转矩经常大幅度变化的场所。

2. 由于串激电动机机械特性较软，当转矩很小时，转速会很高，因此，不能让它空载运行。因为空载时电机的转速可能会上升到危险的高值，电机的机械强度往往不能承受这样大的离心力，而使电机损坏。所以串激电动机一般都不空载起动及空载运行，工作时的最低负载不应小于额定值的25—30%。电动工具有些是经常处于空载状态下的，在设计电动机时，往往使空载转速 $n_o = \frac{1}{0.6} n_N$ 左右，n_N 为电机满载时的转速。

2—4 直流串激电动机的转速调节

在设计制造时，一台串激电动机的转速高低，是由转子导体数的多少来决定的，这个问题我们在 2—3 节中已经进行了分析。下面我们进一步讨论，一台已经制造好的串激电动机使用时如何改变它的转速。根据直流串激电动机的转速公式（式 2—21）。

$$n = \frac{U - IR}{k_e \phi} \qquad 2\text{—}23$$

我们知道，改变转速的方法有三种可能性，即：（1）改变电阻R。（2）改变定子磁通 ϕ。（3）改变电源电压U。这三种方法的调速过程，下面分别讨论。并且假定在调节转速时，负载转矩始终保持不变。

一、改变电阻R

改变电阻的方法就是在电机回路中串联一个调速电阻 R_p（图2—5）。当电阻 R_p 增加时，电机回路的总电阻R便增大，由式2—23可以看出，分子减少，转速下降。反之，当电阻 R_p 减少时，分子增大，转速便上升。所以改变调节电阻 R_p 的大小，可以改变串激电动机的转速。具体的物理过程是这样的：在调速电阻 R_p 增大的最初阶段，电枢电流I减少。由于是串激电机，在电枢电流减少的同时，定子磁通 ϕ 也伴随减少。根据电磁转矩公式 $M = k_M \phi I$，所以电枢电流I及定子磁通 ϕ 的减少，将引起电磁转矩M的减少。而在调速过程中假定负载转矩不变，因此电磁转矩便小于负载转矩，电机的转速开始下降。这就是调速过程的最初阶段的情况。随后，由于电机转速下降，反电势减少，于是电枢电流和电磁转矩又重新回升。如果当转速由 n_1 下降到 n_2 时，电流I及电磁转矩M均上升到原来数值，

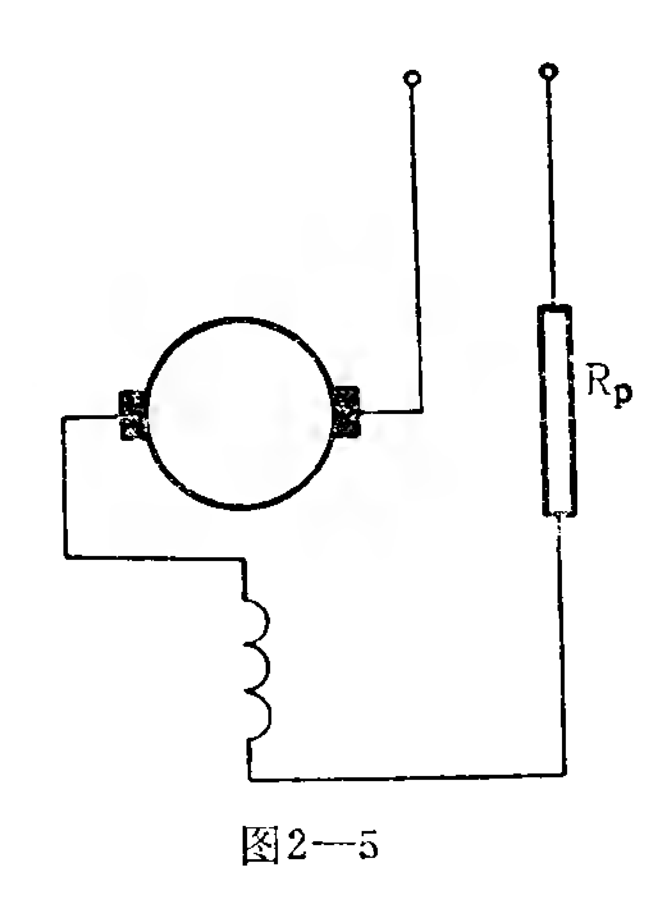


图2—5

电磁转矩又与负载转矩相平衡，电动机便在较低转速n_2下重新稳定运行。所以增加电阻R_p，可以降低电动机的转速。这种调速方法很不经济，电流会在调速电阻R_p上产生较大的损耗，因而降低了电动机的效率。

二、改变定子磁通ϕ

改变定子磁通ϕ的方法有两种：

1.在定子激磁绕组旁边并联一个磁场电阻R_f〔图2—6(a)〕。当R_f减少时，流过R_f的电流增多，流过激磁绕组的电流减少，因此定子磁通ϕ减少。由式2—23可以看出，此时，分母减少，转速上升。反之当R_f增加时，流过R_f的电流就少，流过激磁绕组的电流就多，因此定子磁通增加，由式2—23可以看出，此时分母增加，转速下降。所以改变并联电阻R_f的大小，也可以改变电机的转速。磁场并联的电阻越小，转速越高。

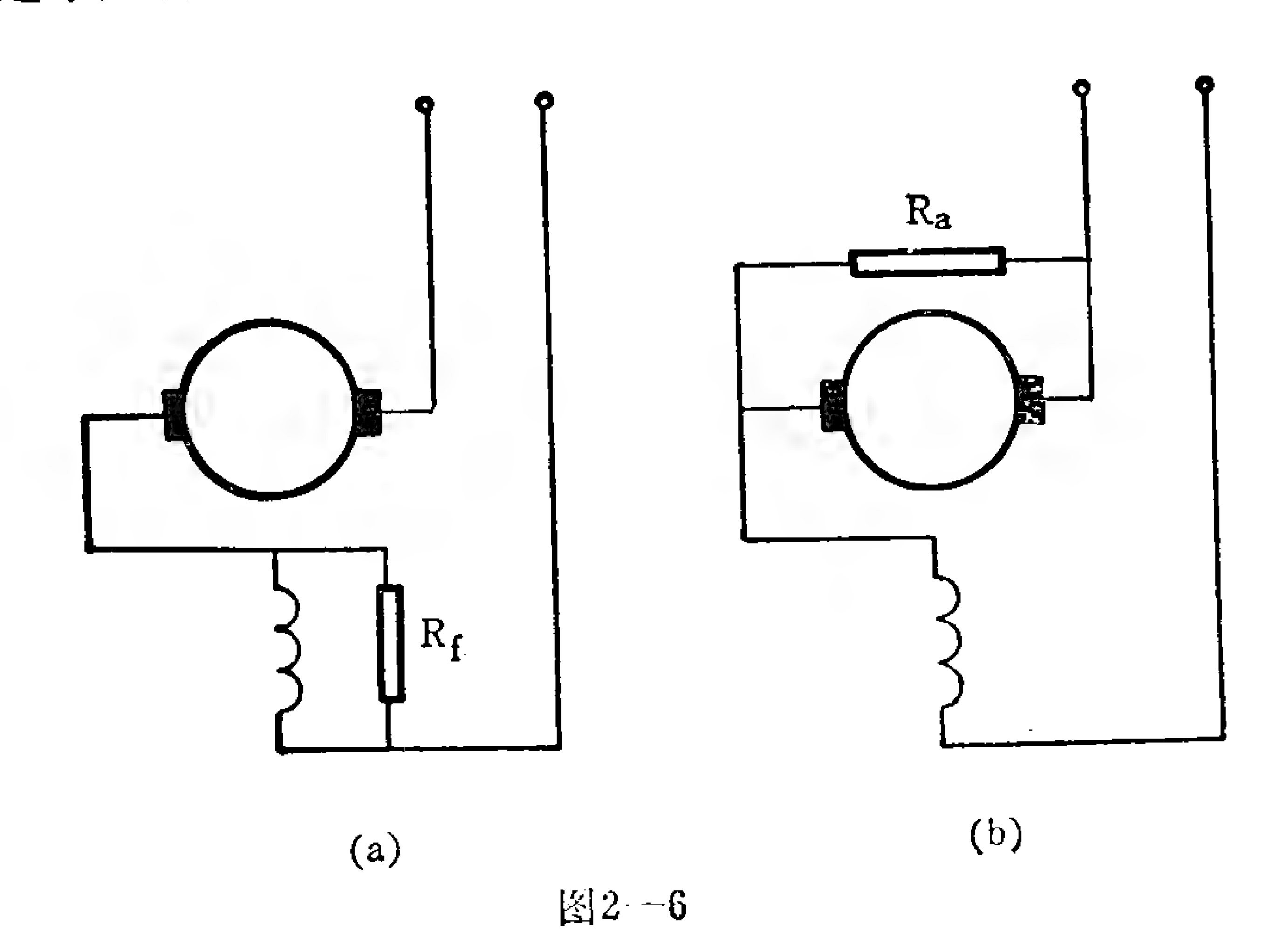


图2—6

这种调速方法的优点是：由于流过R_f的电流较小，所以不仅调节电阻R_f非常轻便，而且在调节电阻上所引起的能量损耗也很轻微，故简单而经济。但并联电阻R_f只能使磁通减少，而无法使磁通增加，因此这种方法只能使转速升高，而无法使转速降低。也就是说这种方法只能在额定转速以上来调节速度，这就限制了它的使用范围。而且转速升高后会使换向发生困难，引起火花（见第5章）。因此，转速也不允许过分的升高。

2.在转子电枢绕组旁边并联一个电阻R_a。这样流过激磁绕组的电流，可以通过两条支路返回电源，一条支路是转子绕组，一条支路是电阻R_a。当电阻R_a减少时，流过激磁绕组的电流就多，定子磁通ϕ就大，由式2—23可以看出，此时分母增大，转速下降。所以改变电阻R_a的大小，也可以改变电机的转速。这种调速方法的特点是：并联电阻R_a只能使磁通ϕ增加，而无法使磁通ϕ减少，因此，这种方法只能使转速降低，而无法使转速升高。这种情况正好与激磁绕组旁边并联电阻的情况相反。

三、改变电源电压U

从式2—23可以看出，升高电源电压U，可以提高电动机的转速，降低电源电压U，则可以降低电动机的转速。具体的物理过程是这样的：在电源电压U增大的最初阶段，电枢电流I增大，由于是串激电机，定子磁通ϕ也伴随增加。根据电磁转矩公式$M=k_M\phi I$，电枢电流I及定子磁通ϕ的增加，将引起电磁转矩M的增大。而在调速过程中假定负载转矩不变，因此电磁转矩便大于负载转矩，电机的转速开始上升。这就是调速过程最初阶段的情况。随后，由于转速升高，反电势

增加（式 2—16），于是电枢电流及电磁转矩又开始回降。如果当转速由 n_1 上升到 n_2 时，电流 I 及电磁转矩 M均下降到原来的数值，电磁转矩又与负载转矩相平衡，电动机便在较高转速n_2下重新稳定运行。所以提高电源电压U，可以升高电动机的转速；反之，降低电源电压U，则可以降低电动机的转速。

四、改变电动机转向的方法

要改变电动机的转向，必须改变电磁转矩的方向。根据电动机左手定则可知，电磁转矩方向的改变有两种途径，即：（1）改变定子磁通的方向〔图2—7(b)〕。(2)改变转子电流的方向〔图 2—7（c)〕。如果两者方向同时改变，则电磁转矩方向不变〔图 2—7 (d)〕。所以，要改变电动机的转向，有两种可能的方法：（1）单独对调激磁绕组的两个接头，以改变定子磁通的方向。（2）单独对调转子绕组两个接头，以改变转子电流的方向。如果对调电源两个接头，则定子磁通与转子电流同时改变方向，电机转向不变。

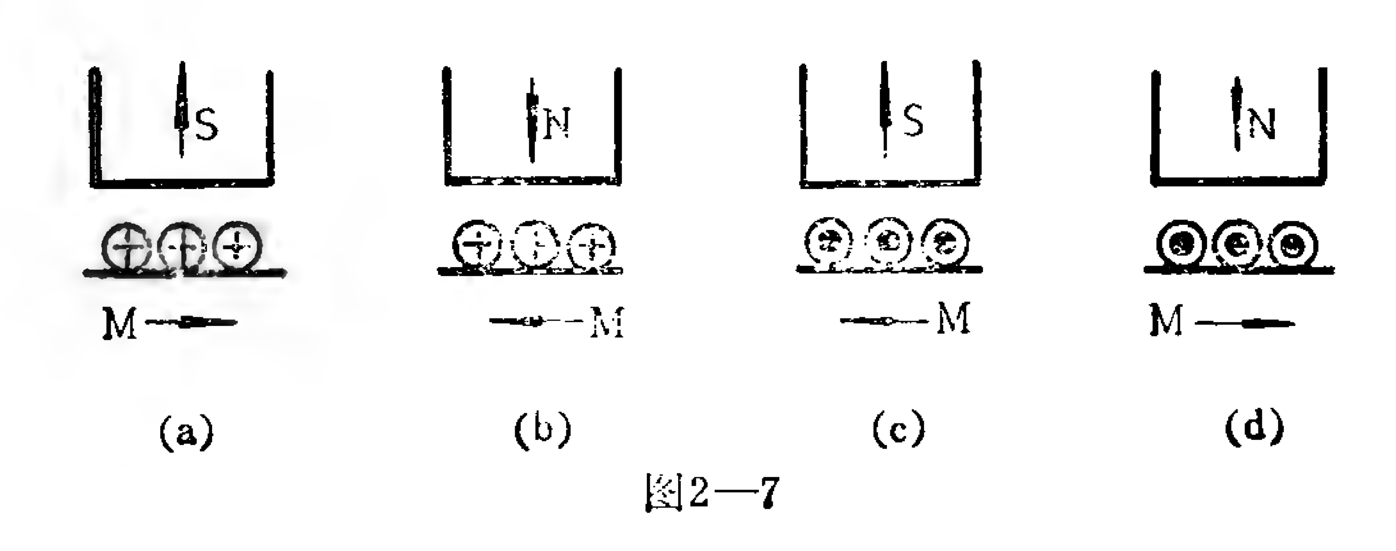


图2—7

第三章　交流串激电动机的性能

在第二章研究直流串激电动机时，我们得到了下面的一些主要结论：

1.转子旋转以后，转子导体将切割定子磁场而产生反电势，反电势是反对电流流入电机的。反电势的数值远较阻抗压降为大，也就是说外施电源电压的大部分是与反电势相平衡的。

2.衡量起动性能的两个重要指标是起动电流和起动转矩。同其它类型电机一样，串激电动机也有比较大的起动电流。但在同样大小起动电流的条件下，串激电动机却能比其它类型电机产生较大的起动转矩。

3.一般情况下，异步电动机转速最高不超过3000转/分。但串激电动机却可以用减少转子导体数的方法，来提高它的转速。转速提高以后可以减小电机的体积和重量。

4.串激电动机有比较软的机械特性，这就使它产生两个比较突出的特点：（1）一般串激电动机不允许空载运行，否则转速会上升到危险的高值，可能使电机损坏。（2）由于在转矩增加的同时，转速下降，所以功率增加不多，串激电动机不容易因负载转矩增大而过载，可以用在负载转矩大幅度变化的场所。

5.对于一台已经造好的串激电动机，可以用下面三种方法来调节它的转速，即：（1）改变电机电阻R。（2）改

变定子磁通ϕ。（3）改变电源电压$\dot{U}$。

上面提到的这些性能，不仅直流串激电动机具有，也是交流串激电动机所具有，两者的分析方法大同小异，只不过直流串激电动机分析起来更简单些，所以我们以它为例来进行说明。这些性能是两种电机所共同具有的特点，下面我们将进一步分析它们的不同之处。

3－1　交流串激电动机的电磁转矩

在这一节中我们主要研究下面三个问题：（1）串激电动机在交流电源下工作，和在直流电源下工作，它所产生的转矩各具有什么特点。（2）在具有同样大小电流条件下，串激电动机是在直流电源下工作时产生的转矩大，还是在交流电源下工作时产生的转矩大。（3）交流串激电动机转矩的计算公式。

首先我们看串激电动机在直流电源下的工作情况。

直流电流就是大小及方向不随时间而变化的电流。图3—1(a) 就表示了直流电的性质。横坐标表示时间t，电流I

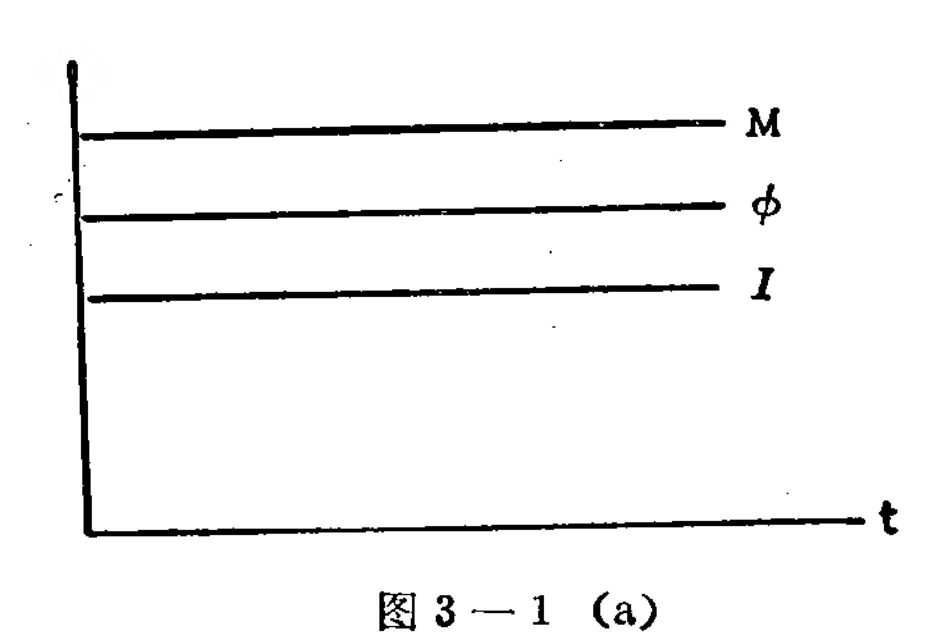


图3—1 (a)

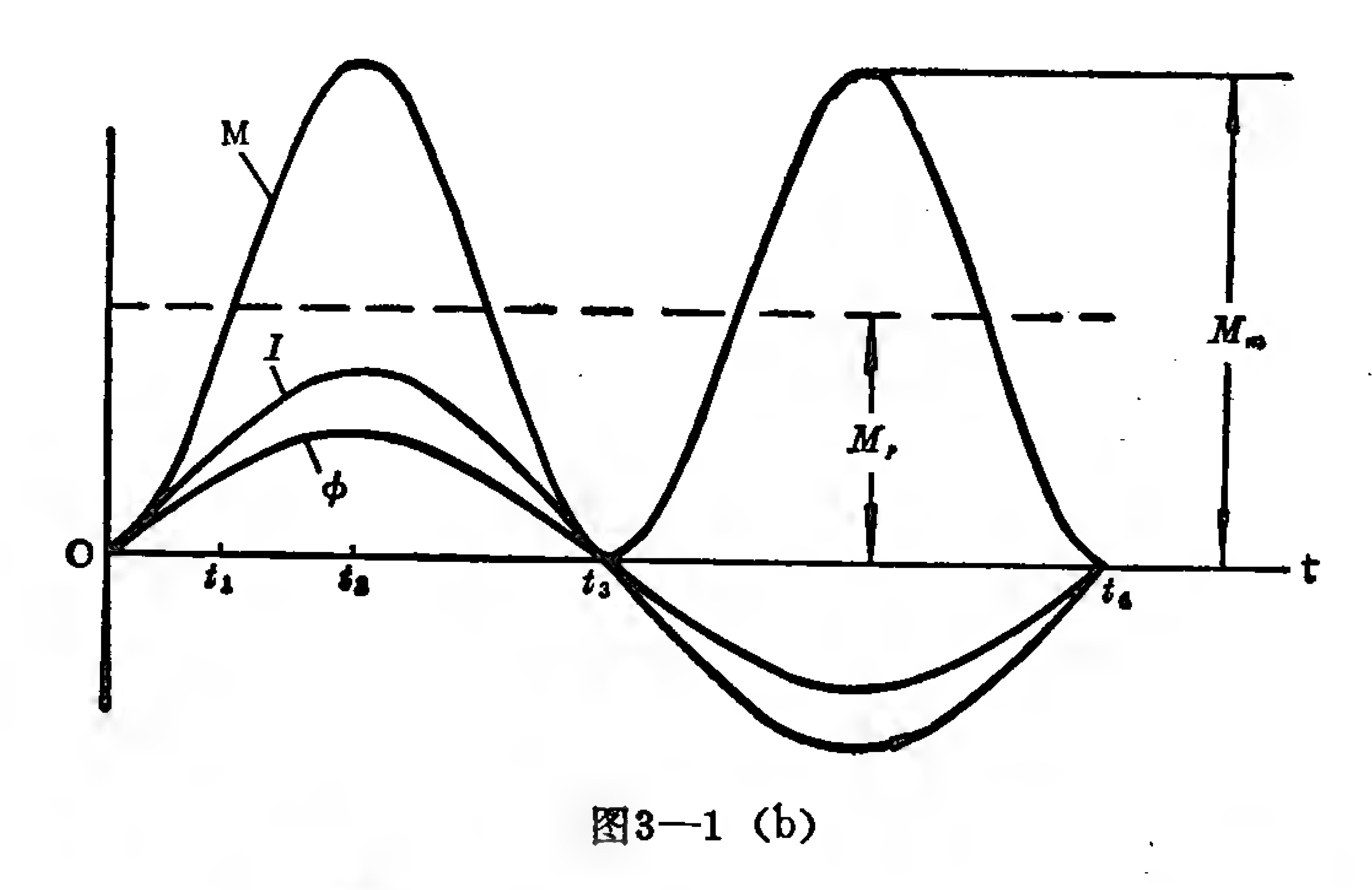


图3—1 (b)

是一条平行于横坐标的直线。同样，由于定子每极磁通ϕ是由直流电产生的，电流I的大小不随时间而变化，磁通ϕ的大小也不会随时间而变化，因此在图3—1(a)中，磁通ϕ也是平行于横坐标的一条直线。式2—17告诉我们，电磁转矩M正比于磁通ϕ与电流I的乘积，既然磁通ϕ及电流I不随时间而变化，那它们的乘积也不会随时间而变化，所以在图3—1(a)中电磁转矩M也是一条平行于横坐标的直线。也就是说串激电动机在直流电源下工作时，它产生的转矩是恒定的，转矩大小不随时间而变化，因此电机运行起来比较平稳。

下面我们再来看交流串激电动机。交流串激电动机是在交流电源下工作，交流电的特点是电流大小及方向随时间而变化，图3—1(b)就表示了交流电的性质。一般情况下电流随时间作正弦变化。磁通ϕ是由电流I产生的，当然也随时间作正弦变化。电流I与磁通ϕ的乘积对应于转矩M，因

此，当电流 I 及磁通 ϕ 小时〔图 3—1 (b) 中时间 t_1〕，电磁转矩 M 也小。电流 I 及磁通 ϕ 达到最大值时（时间 t_2），电磁转矩 M 也达到最大值。电流 I 及磁通 ϕ 为零时（时间 t_3），电磁转矩也为零。既然电流及磁通随时间作正弦变化，那它们就有正半波和负半波。在图 3—1 (b) 中，在时间 0—t_3 范围内为正半波，电流及磁通都是正的，当然所产生的转矩也是正的。在图 3—1 (b) 中，在时间 t_3—t_4 范围内为负半波，也就是电流反方向流动了，此时产生的转矩是正还是负呢？数学中有这样的定理，负数乘负数还是一个正数。因此，虽然电流和磁通都是负数，但它们的乘积还是正的。所以在 t_3—t_4 时间范围内，电磁转矩是正的。这个结论与图 1—5 所表示的工作原理完全对应。在图 3—1 (b) 中，在 0—t_3 时间范围内，电流磁通都是正半波，这相当于图 1—5 (a) 所表示的情况。在图 3—1 (b) 中，在 t_3—t_4 时间范围内，电流磁通都是负半波，也就是电流磁通反方向流动了，这相当于图 1—5 (b) 所表示的情况。图 1—5 (a) 和 (b) 清楚地告诉我们，在磁通电流同时改变方向的情况下，电磁转矩的方向是不改变的。因此在图 3—1 (b) 中，不管是对应于电流磁通的正半波还是负半波，电磁转矩的方向不变，仍然是正半波。从图 3—1 (b) 可以清楚地看到，交流串激电动机电磁转矩的方向虽然不变，但大小却随时间而变化。由于电磁转矩中存在着交变分量，所以一台串激电动机在交流电源下工作就不如在直流电源下工作时平稳，容易产生振动及噪音。真正能够带动负载的是转矩的平均值 M_p〔图3—1 (b) 中虚线〕，显然，平均转矩 M_p 是最大转矩 M_m 的一半，即

$$M_p = \frac{1}{2}M_m \qquad 3-1$$

以上我们研究了串激电动机转矩的性质，即串激电动机在直流电源下工作时，电磁转矩的大小不随时间而变化；而串激电动机在交流电源下工作时，电磁转矩的方向虽然不变，但大小却随时间而变化，由于电磁转矩中存在着显著的交变分量，所以串激电动机在交流电源下工作就不如在直流电源下工作时平稳。

下面我们再来研究电磁转矩的大小，也就是说，在流过同样大小电流的条件下，串激电动机是在交流电源下工作时产生的转矩大还是在直流电源下工作时产生的转矩大。要搞清楚这个问题，首先要说明一下直流电和交流电的性质。我们知道，直流电的大小是不随时间而变化的（图3—2），如果有2安培直流电流流入串激电动机，那就是说不论在任

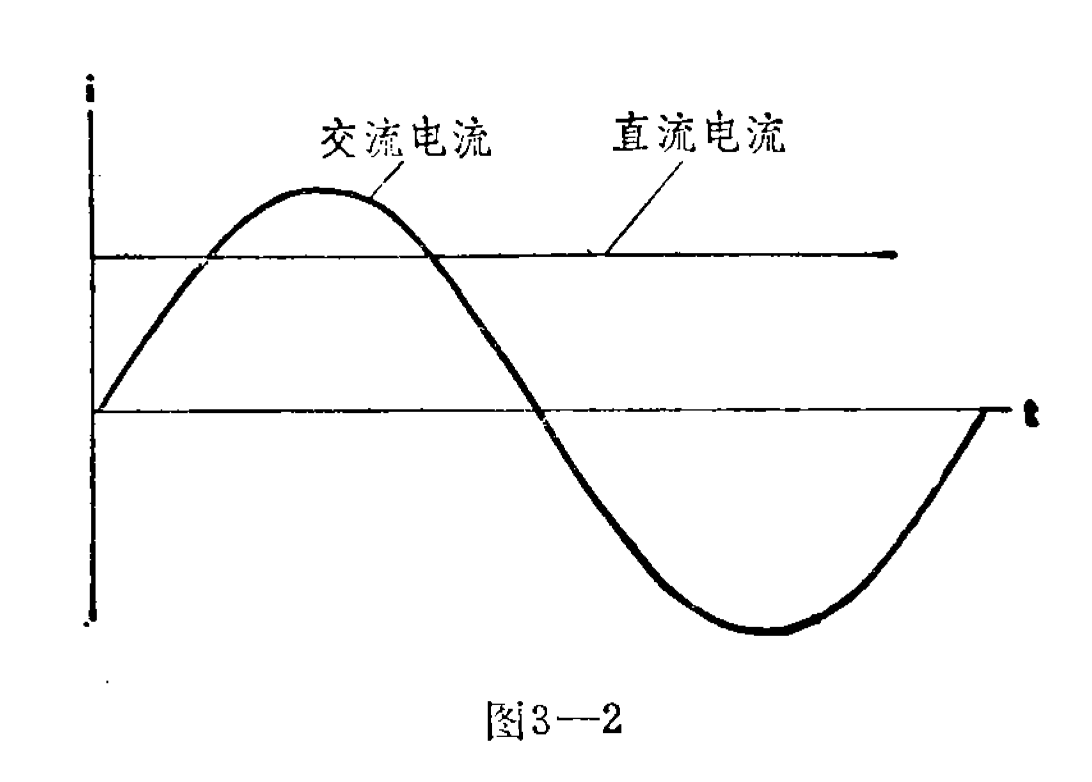


图3—2

何瞬间，这台串激电动机中都流过2安培电流。而交流电的

性质则不同，它的大小是随时间而变化的，我们说有2安培交流电流流入串激电动机，这2安培不是指那一瞬间的电流，而是指它的有效值。我们说流过同样大小的直流电流和交流电流，是指直流电流的大小和交流电流的有效值相等。弄清楚这个问题以后，我们就可进一步来研究，在流过同样大小的电流条件下，到底是在交流电源下工作时产生的转矩大，还是在直流电源下工作时产生的转矩大？

令I_-表示直流电流，$I_\sim$表示交流电流的有效值，ϕ_-表示直流运行时磁通，$\phi_\sim$表示交流运行时磁通。根据式2—17我们知道，在直流电源下工作时的转矩为

$$M_- = k_M \phi_- I_- \quad 3-2$$

下面我们再来看在交流电源下工作时的转矩。图3—1(b)告诉我们，交流串激电动机的转矩大小随时间不断变化，我们现在来求它转矩的最大值M_m。图3—1(b)表明了最大转矩是与电流的最大值与磁通的最大值相对应的。令I_m表示电流的最大值，ϕ_m表示每极磁通的最大值，则最大转矩M_m应为

$$M_m = k_M \phi_m I_m \quad 3-3$$

要弄清楚交流转矩M_m与直流转矩M_-之间的关系，首先必须弄清楚交流电流及磁通I_m、ϕ_m与直流电流及磁通I_-、ϕ_-之间的关系。我们首先研究电流之间的关系。根据电工知识我们知道，在交流电中，电流最大值I_m是电流有效值$I_\sim$的$\sqrt{2}$倍，即

$$I_m = \sqrt{2} I_\sim \quad 3-4$$

而前面我们是假定在流过同样大小的直流电流及交流电流情况下来研究转矩的，即$I_\sim = I_-$。将此关系代入式3—4得

$$I_m = \sqrt{2} I_{\sim} = \sqrt{2} I_{=} \quad 3-5$$

现在再来研究磁通之间的关系。由于磁通是由电流产生的，当然它的大小正比于电流，因此，$\phi_{=}$ 正比于 $I_{=}$，ϕ_m 正比于 I_m，而 I_m 是 $I_{=}$ 的 $\sqrt{2}$ 倍，必然 ϕ_m 也是 $\phi_{=}$ 的 $\sqrt{2}$ 倍。即

$$\phi_m = \sqrt{2} \phi_{=} \quad 3-6$$

将式 3—5 及式 3—6 代入 3—3，得到

$$M_m = k_M(\sqrt{2} I_{=})(\sqrt{2} \phi_{=})$$

$$= 2k_M I_{=} \phi_{=} = 2M_{=} \quad 3-7$$

式 3—7 告诉我们，一台串激电动机在交流电源下工作所能产生转矩的最大值 M_m，是在直流电源下工作所能产生 $M_{=}$ 的 2 倍。前面我们已经提到，真正能够带动负载的不是转矩的最大值 M_m，而是转矩的平均值 M_p〔图 3—1 (b)〕。式 3—1 告诉我们

$$M_p = \frac{1}{2} M_m \quad 3-8$$

将式 3—7 代入式 3—8 可得

$$M_p = \frac{1}{2} M_m$$

$$= \frac{1}{2}(2M_{=}) = M_{=} \quad 3-9$$

即交流转矩的平均值 M_p 与直流转矩 $M_{=}$ 相等。因此我们可以得到一个重要的结论：在流过同样大小电流的条件下，串激电动机在交流电源下工作时所能产生的、能够带动负载的有效转矩，与在直流电源下工作时所产生的转矩相等，也就是说能够带动同样大小的负载。

最后我们来推导交流串激电动机电磁转矩的计算公式。

如前所述，对交流串激电动机而言，真正有用的能够带动负载的是转矩的平均值M_p。将式3—3代入3—1可以得到

$$M_p = \frac{1}{2}M_m = \frac{1}{2}k_M\phi_m I_m \qquad 3—10$$

理论上讲式3—10就可以用来计算交流串激电动机的电磁转矩，但为了使公式的形式更符合一般习惯，需要将式3—10进行一些简单的变换。我们知道，在交流电中，磁通都是用最大值来表示的，而电流却是用有效值来表示的。有效值I与最大值I_m之间的关系是$I = \frac{1}{\sqrt{2}}I_m$，将此式代入式3—10，就可以得到交流串激电动机电磁转矩的最后表示式，即

$$M_p = \frac{1}{2}k_M\phi_m I_m = \frac{1}{\sqrt{2}}k_M\phi_m\left(\frac{1}{\sqrt{2}}I_m\right)$$

或

$$M_p = \frac{1}{\sqrt{2}}k_M\phi_m I \qquad 3—11$$

式中：M_p——交流串激电动机的电磁转矩，克—厘米；

ϕ_m——定子每极磁通，马克斯韦尔，可用式2—6计算；

I——交流电流的有效值，安；

$k_M = \frac{10^{-3}}{61.6}N$，其中N为转子导体数。

3-2 反电势计算公式及电势平衡方程式

一、反电势计算公式

交流串激电动机旋转起来以后，转子导体也要切割定子

磁场而产生感应电势，利用图2—1的分析方法可以知道，这个感应电势的方向也和电枢电流方向相反，是反对电流流入电机的，也称其为反电势。如同直流串激电动机反电势公式的推导方法一样，在交流串激电动机中，转子每根导体的反电势 e 正比于空气隙内的磁通密度 B，也就是正比于电机的每极磁通 ϕ。每根导体的反电势还正比于导体切割磁通的速度 v，也就是正比于转子转速 n。每根转子导体均切割定子磁通而产生反电势，当然，转子的总导体N越多，转子绕组总的反电势 E也会越大。因此，在交流串激电动机中，也存在下面的关系

$$e \xrightarrow{\text{正比于}} \phi n$$

$$E \xrightarrow{\text{正比于}} Ne$$

$$E \xrightarrow{\text{正比于}} N\phi n$$

这与式2—2、式2—3及式2—4所表示的关系完全一样，因此，式2—5所表示的反电势计算公式也适用于交流串激电动机。但为了更适应交流电的特点，我们还得将公式2—5进行下面的变换。

式2—5告诉我们，反电势 E的大小是正比于定子磁通 ϕ 的。在交流串激电动机中，磁通 ϕ 在随时间而交变，反电势E便也随时间而交变。当磁通达到最大值 ϕ_m 时，反电势E便也达到最大值E_m，将此关系代入式2—5，便可以得到交流串激电动机反电势最大值的计算公式，即

$$E_m = \frac{10^{-8}}{60} N\phi_m n \qquad 3—12$$

在交流电中，电势都是用有效值来表示的，而有效值E与

最大值 E_m 之间的关系是 $E=\frac{1}{\sqrt{2}}E_m$，将此式代入式 3—12 中，即可得到交流串激电动机反电势的计算公式，即

$$E=\frac{1}{\sqrt{2}}E_m=\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{10^{-8}}{60}N\phi_m n$$

或

$$E=\frac{1}{\sqrt{2}}k_e\phi_m n \qquad 3—13$$

式中：E——交流串激电动机反电势的有效值，伏；

n——转子转速，转/分；

ϕ_m——定子每极磁通，马克斯韦尔，可用式 2—6 计算；

$k_e=\frac{10^{-8}}{60}N$，其中 N 为转子导体数。

二、电势平衡方程式

在研究交流串激电动机电势平衡方程式以前，我们先回顾一下直流串激电动机的电势平衡方程式。直流串激电动机的电势平衡方程式（式 2—15）为

$$U=E+IR \qquad 3—14$$

电压U倾向于将电流送入电机内部，而反电势E及电阻压降IR则反对电流流入电机，当稳定运行时，两者应该相等，所以得到式 3—14 所表示的直流串激电动机的电势平衡方程式。

但在交流串激电动机中，除了反电势E及电阻压降IR反对电流流入电机以外，还有电抗压降。根据电工知识我们知道，任何绕组，不论是定子绕组还是转子绕组，都具有电抗X，在交流电源下运行时，将产生电抗压降 $j\dot{I}X$。电抗压降的

性质同电阻压降一样，也是反对电流流入电机内部的，这样交流串激电动机的电势平衡方程式便为

$$\dot{U}=\dot{E}+\dot{I}R+j\dot{I}X \qquad 3-15$$

3—3 相量图及功率因数

一、交流串激电动机的相量图

在交流电中，电压电流之间存在着相位关系，式3—15中 E、$\dot{U}$、$\dot{I}$ 上面都带有小点，就表示了这是一个相量方程式，即不仅表示了各种数量的大小，而且也表示了它们之间的相位，这个关系在相量图中看得最为明显，下面我们就来分析与电势平衡方程式（式3—15）相对应的相量图（图3—3）。

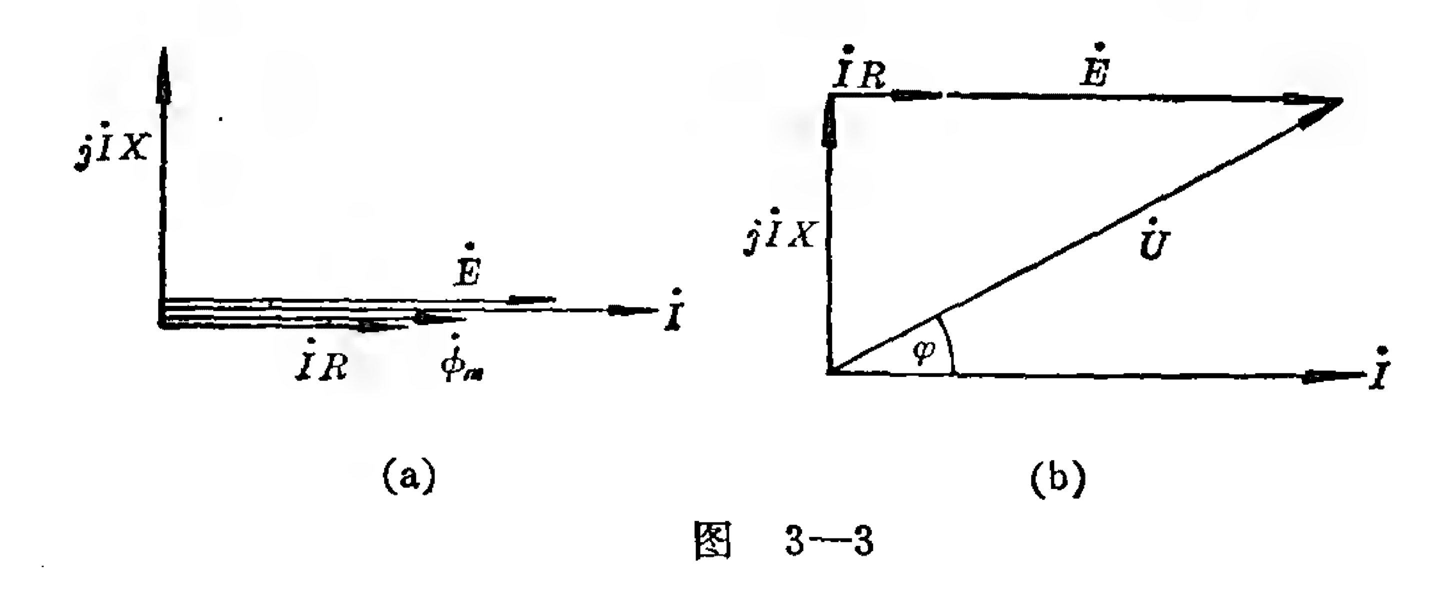


图 3—3

要画出相量图，首先要研究各量之间的相位关系。在图3—3（a）中，我们选定参考相量 $\dot{I}$ 在水平方向上。电流 $\dot{I}$ 流过定子绕组以后，产生磁通 ϕ_m。电流 $\dot{I}$ 大，磁通 ϕ_m 也大，电流 $\dot{I}$ 小，磁通 ϕ_m 也小，如果不考虑由于磁通 ϕ_m 交变在定、转子铁心及换向元件中产生的损耗，则电流 $\dot{I}$ 与磁通 ϕ_m 之间同相位，所以磁通 ϕ_m 也应画在水平方向。转子导体切割定子磁通

$\dot{\Phi}_m$，产生反电势$\dot{E}$。显然，定子磁通$\dot{\Phi}_m$越大，反电势$\dot{E}$也越大，定子磁通Φ_m越小，反电势$\dot{E}$也越小，所以磁通$\dot{\Phi}_m$与反电势$\dot{E}$也同相位，反电势$\dot{E}$也应画在水平方向。根据电工知识我们知道，电抗压降是领前电流 90° 的。所以以电流相量为参考，在逆时针转过90°的地方，画出了电抗压降$j\dot{I}X$的相量。电阻压降$\dot{I}R$总是与电流$\dot{I}$同相位的，电阻压降$\dot{I}R$也是画在水平方向。有了$\dot{E}$、$j\dot{I}X$及$\dot{I}R$三根相量以后，根据式3—15将它们相加在一起便得到电机的相量图〔图3—3(b)〕。电机的许多性能都可以用电势平衡方程式及相量图来解释，下面我们以功率因数为例进行说明。

二、交流串激电动机的功率因数

从交流串激电动机的相量图〔图3—3(b)〕可以看出，电压$\dot{U}$的相量与电流$\dot{I}$的相量是不重合的，电流$\dot{I}$总是落后电压$\dot{U}$一个角度φ。φ角的大小就决定了电机功率因数cosφ的高或低。φ角大，功率因数cosφ就小。反之，φ角小，功率因数cosφ就大。我们总是希望电机的功率因数越高越好。在设计电机时，我们采用什么方法才可以提高交流串激电动机的功率因数呢？从图3—3(b)的分析我们知道，要提高功率因数cosφ，也就是要减少φ角。要减少φ角，也就是要减少电抗压降$j\dot{I}X$，或者说减少电抗X。任何电机，它的电抗越小，它的功率因数才会越高，这是一个普遍的规律，串激电动机当然也不会例外。那么，电抗X又如何才能减少呢？电工知识告诉我们，电抗X是正比于绕组匝数平方的。要减少电抗X，就是要减少定、转子绕组的匝数。因此，根据上面分析，提高功率因数的根本途径是：

1.将电机设计成高转速的。因为从2—3节的分析我们

知道，电机转速越高，转子导体数就越少，转子电抗也就小下来了，电机的功率因数便可以越高。这个现象从附表一 9 中所列的数据也可以看出，随着转速的提高，功率因数也提高。由于单相交流串激电动机大多数是设计成高转速的，因此它的功率因数要比一般单相异步电动机高得多。

2.减少定子匝数以减少定子电抗。不过，定子匝数减少以后，电机的激磁磁势就减少，为了仍能产生足够多的磁通，定子转子之间的空气隙就不能过大，目前生产的串激电动机，气隙长度约为转子直径的 1/100 左右。

对于一台已经制造好的电机，在使用时，它的功率因数又如何随负载而变化呢？它们的变化关系如图 3 — 4 所示。横坐标是转矩，纵坐标是功率因数。从图中可以看出，随着转矩的增大，功率因数下降。这是因为随着转矩的增加，电流增大，电抗压降 $j\dot{I}X$ 也增大。同时，串激电动机机械特性很软，随着转矩 M 的增大，转速 n 降低很快，因而使反电势E 下降。从

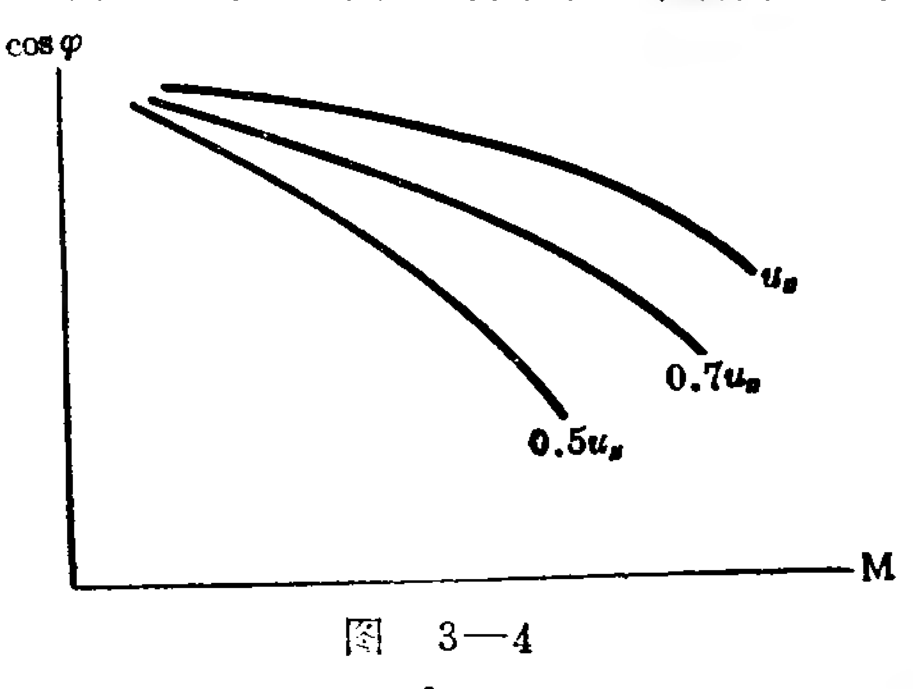


图 3—4

图 3 — 3 (b) 可以看出：当电源电压 $\dot{U}$ 不变时，在 $j\dot{I}X$ 幅值增大及 $\dot{E}$ 幅值下降的情况下，电压 $\dot{U}$ 及电流 $\dot{I}$ 之间的夹角φ 增大，从而使电机的功率因数cosφ下降。所以随着负载转矩 M 的增大，串激电动机的功率因数cosφ总是减少的，形成了如图 3 — 4 所表示一条特性曲线。

在使用串激电动机时，电压的高低对功率因数的大小也有很大的影响。从图3—4可以看出，电压降低以后，整个功率因数曲线都下降。也就是说，当转矩M不变时，电压降低，功率因数就减少。这是因为：当转矩不变时，电流$\dot{I}$及电抗压降$j\dot{I}X$的幅值也不会改变；而当电压降低时，电机转速下降，反电势$\dot{E}$减少。从图3—3（b）可以看出，在$j\dot{I}X$的幅值保持不变时，如果$\dot{U}$及$\dot{E}$的幅值在减少，势必使电压相量$\dot{U}$及电流相量$\dot{I}$之间的夹角增大，故功率因数下降。所以降低电压时，转速较低，功率因数也较低。

由于交流串激电动机的额定转速愈高，功率因数就愈好，体积重量也愈小，成本也能降低。因此，交流串激电动机的转速一般都在4000转/分以上。

3—4 交流串激电动机的转速与机械特性

在3—1节我们分析转矩时曾经提到，在流过同样大小电流的条件下，串激电动机在交流电源下工作时所产生的有效转矩，与在直流电源下工作时所产生的转矩相等。在这一节中我们将进一步研究串激电动机的转速问题，也就是说，在流过同样大小电流的条件下，或者说在具有同样大小负载转矩的条件下，串激电动机是在直流电源下工作时的转速高，还是在交流电源下工作时的转速高？

首先我们回顾一下直流串激电动机的电势平衡方程式（式2—15）

$$U = IR + E \qquad 3—16$$

将IR移到等式的左边后，得

$$U - IR = E \qquad 3—17$$

将式2—16代入式3—17，得

$$U-IR=k_e\phi n \qquad 3—18$$

为了与交流串激电动机的转速相区别，令直流串激电动机的转速 $n=n_=$，将此关系代入式3—18中，得

$$U-IR=k_e\phi n_= \qquad 3—19$$

下面我们再来研究交流串激电动机的相量图，从图3—3(b)各相量的几何关系可以看出

$$U\cos\varphi=E+IR \qquad 3—20$$

将IR移到等式的左边后，得到

$$U\cos\varphi-IR=E \qquad 3—21$$

将式3—13代入式3—21得到

$$U\cos\varphi-IR=\frac{1}{\sqrt{2}}k_e\phi_m n \qquad 3—22$$

为了与直流串激电动机转速相区别，令交流串激电动机转速 $n=n_\sim$，将此关系代入式3—22中，得到

$$U\cos\varphi-IR=\frac{1}{\sqrt{2}}k_e\phi_m n_\sim \qquad 3—23$$

前面我们已经提到，是在电流相等的条件下来研究转速问题的。所谓电流相等是指交流电流的有效值同直流电流相等。而交流电流的最大值 I_m 是其有效值的 $\sqrt{2}$ 倍，也就是说，交流电流的最大值 I_m 是直流电流I的 $\sqrt{2}$ 倍，即 $I_m=\sqrt{2}I$。磁通是正比于电流的，所以交流磁通的最大值 ϕ_m 也是直流磁通 ϕ 的 $\sqrt{2}$ 倍，即 $\phi_m=\sqrt{2}\phi$，将此关系代入式3—23，得到

$$U\cos\varphi-IR=\frac{1}{\sqrt{2}}k_e(\sqrt{2}\phi)n_\sim$$

或

$$U\cos\varphi-IR=k_e\phi n_\sim \qquad 3—24$$

从式3—19及式3—24可以得到在两种不同电源下运行时转速的比值

$$\frac{n_{\sim}}{n_{=}}=\frac{U\cos\varphi-IR}{U-IR} \qquad 3-25$$

将式3—25右边的分子分母均除以U，得到

$$\frac{n_{\sim}}{n_{=}}=\frac{\cos\varphi-\frac{IR}{U}}{1-\frac{IR}{U}} \qquad 3-26$$

根据一般电机的统计数字来看，满载时 $\frac{IR}{U}=0.1\sim0.15$ 之间，如果略去电阻压降 IR 的影响，则在两种不同电源下运行时的转速比为

$$\frac{n_{\sim}}{n_{=}}=\cos\varphi \qquad 3-27$$

式3—27是研究串激电动机在两种不同电源下运行时转速变化的一个重要公式，它告诉我们下面几点结论：

1. 由于功率因数 cosφ 总是小于1的，因此串激电动机在交流电源下运行时的转速 $n_{\sim}$，总是低于在直流电源下运行时的转速$n_{=}$，使得机械特性曲线的形状如图3—5所示。在图中实线是直流电运行时的机械特性，虚线是交流电运行时的机械特性。比较这两条曲线可以看出：转速越低，交流转速 $n_{\sim}$ 低于直流转速 $n_{=}$的数值也越大。这是因为对串激电动机而言，它的转速降低以后，

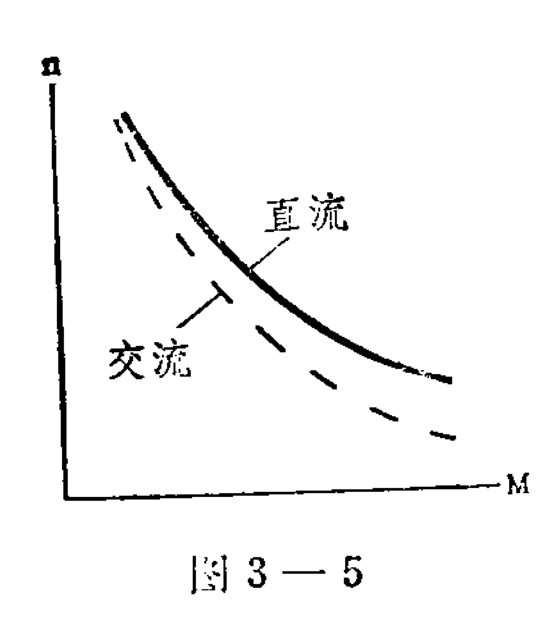


图3—5

功率因数就降低（理由见3—3节），从式3—27可以看出，功率因数越低，交流转速$n_{\sim}$低于直流$n_{=}$的数值也就越大。所以交流运行的机械特性比直流运行时的机械特性下降得更快，或者说，交流运行时的机械特性比直流运行时的机械特性更软。

2. 如果串激电动机的额定转速比较高，它的功率因数也就比较高(理由见3—3节)，那么，交流转速$n_{\sim}$与直流转速$n_{=}$就会比较接近。在使用时无须采取特殊措施，串激电动机在两种电源下的运行性能也比较接近。例如附表—3所列出的电动工具用交、直流两用串激电动机，转速高达9900—14300转/分。由于转速高，功率因数高，在交、直流电源下运行时的转速比较接近，因此，这种串激电动机在交、直流电源下运行时，不需采取特殊措施，它们的性能也基本上一样。

如果串激电动机的额定转速比较低，它的功率因数也就比较低，交流转速$n_{\sim}$低于直流转速$n_{=}$的数值就会比较大。为了保证串激电动机在两种电源下工作时，性能比较接近，必须采取措施来降低串激电动机在直流电源下运行时的转速。方法就是在直流电压下运行时，增加激磁绕组的匝数（图3—6）。因为增加了匝数，也就是增加了定子磁通。从式2—23可以看出，磁通增加，分母变大，转速也就降下来了。例如附表—7所列出的SU型交、直流

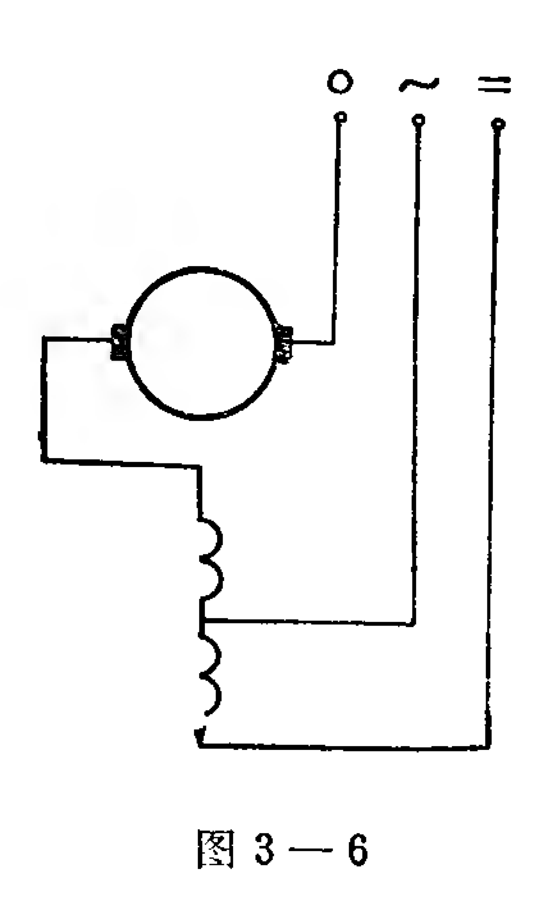


图3—6

两用串激电动机额定转速只有2500转/分，由于转速低，功率因数也就低，使得交流转速 $n_{\sim}$ 低于直流转速 n_{-} 的数值比较大。为了保证在两种电源下运行时具有相同的转速，增加了在直流电源下运行时激磁绕组的匝数。具体数据请详见附表一7。图3—6就是这种电机的定子绕组接线示意图。

在进行上面分析时，我们略去了一个重要的因素，那就是饱和。我们知道，在交流电流的有效值与直流电流相等时，交流电流的最大值是直流电流的 $\sqrt{2}$ 倍，那交流磁通的最大值 ϕ_m 也应是直流磁通 ϕ 的 $\sqrt{2}$ 倍，即 $\phi_m = \sqrt{2}\phi$。因此，在电流相同的条件下，交流运行时电机内部磁通多，磁通密度高，电机比较饱和。在不考虑饱和时，$\phi_m = \sqrt{2}\phi$。但考虑饱和以后，磁通增加不上去，使得 $\phi_m < \sqrt{2}\phi$。也就是说，由于饱和的影响，交流运行时，磁通达不到它应有的数值。由式3—23可以知道交流转速

$$n_{\sim} = \frac{U\cos\varphi - IR}{\frac{1}{\sqrt{2}}k_e\phi_m} \qquad 3—28$$

即交流转速 $n_{\sim}$ 是反比于磁通最大值 ϕ_m 的。ϕ_m 小了，$n_{\sim}$ 就会高些。交流运行时，由于饱和的影响，ϕ_m 达不到它应有的数值，这会抬高交流转速 $n_{\sim}$，减少了交流转速 $n_{\sim}$ 与直流转速 n_{-} 之间的差值。或者说，由于饱和的影响提高了交流运行时机械特性的硬度。此外，由于硅钢片在交流电流下的磁化特性与在直流电流下的磁化特性不相同，这也会影响机械特性曲线的形状，有关这方面的深入问题就不再进行分析了。

下面我们再进一步研究当电源电压变化时，交流串激电动机机械特性的变化情况。图3—7中的曲线清楚地告诉我

们，随着电源电压的降低，机械特性曲线向下移动。或者说，在转矩相同的情况下，电源电压下降，电机的转速也随之降低。因为从式3—11可以看出，当转矩大小不变时，电

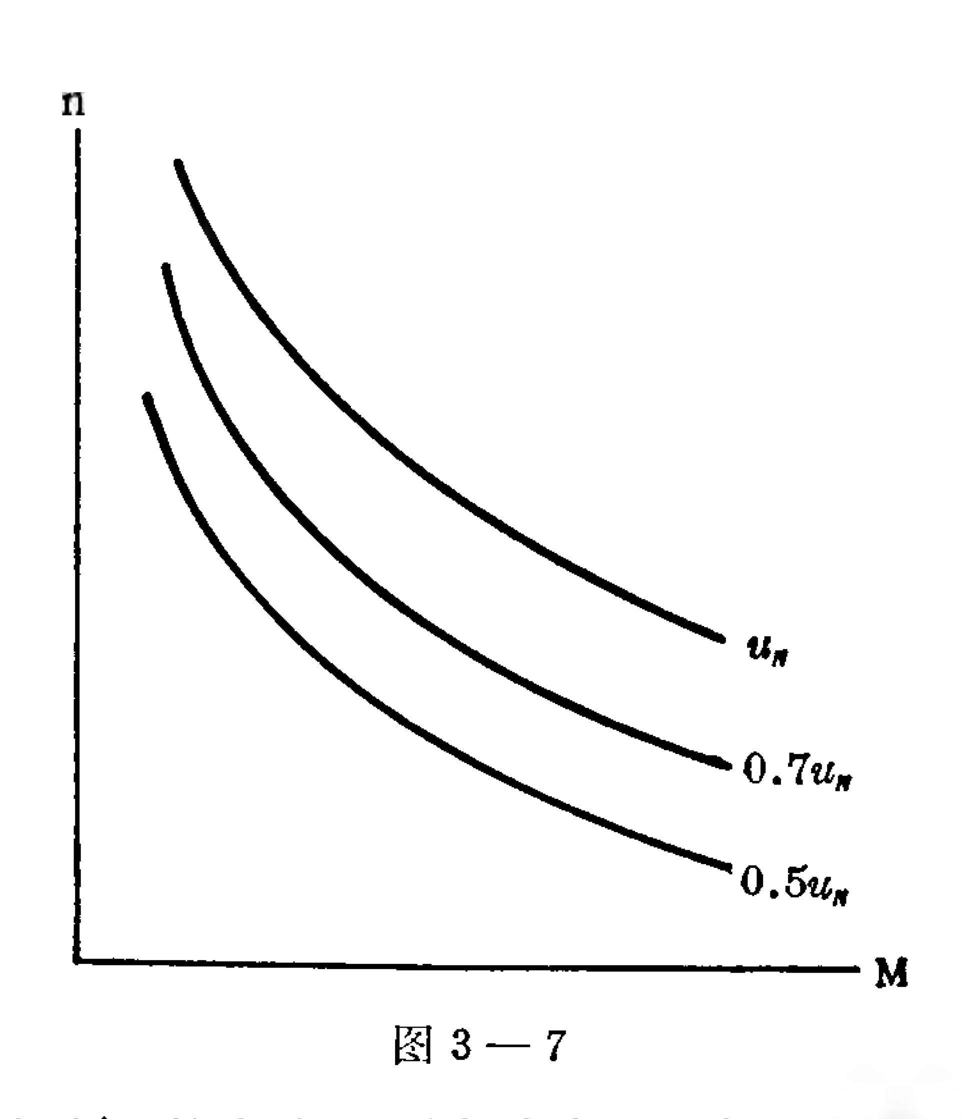


图3—7

流I及磁通ϕ_m的大小也不会改变。从交流串激电动机的转速公式（式3—28）又可以看出，当I及ϕ_m的大小不变时，降低电源电压U，当然交流转速$n_\sim$也随之降低。所以，随着电源电压的下降，使机械特性曲线向下移动。这种特性，给我们调节串激电动机的转速提供了方便。只要利用调压器，降低电源电压，就可以降低交流串激电动机的转速。这是生产实践中交流串激电动机常采用的调速方法之一。

3—5 交流串激电动机的转速调节

在2—4节中我们曾经提到调节直流串激电动机转速的

三种可能方法，即：（1）改变电机电阻 R。（2）改变定子磁通 φ。（3）改变电源电压 U。原则上这三种方法在交流串激电动机中也可以采用。在这一节中我们所要介绍的主要内容是：随着电子器件的发展，如何利用可控硅来调节交流串激电动机的转速。

图 3—8 就是利用可控硅来调节单相串激电动机转速的典型线路之一，其中粗线表示主回路，细线表示控制回路。主回路是传送电能的，控制回路则是控制转速高低的，它们的工作原理分述如下。

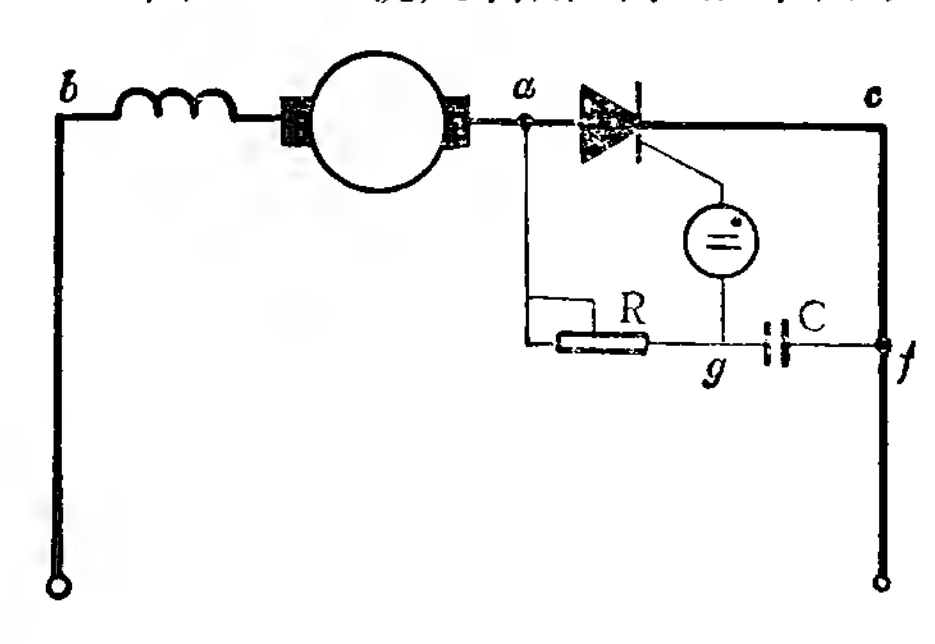


图 3—8

一、主回路

主回路由串激电动机及可控硅所组成。要明白如何利用可控硅来控制单相串激电动机的转速，首先要知道可控硅的基本工作原理。可控硅有三个电极，（图 3—9），即阳极 a 阴极 c 及控制极 g。可控硅的工作原理，可以通过图 3—10 及图 3—11的两个简单试验来说明。

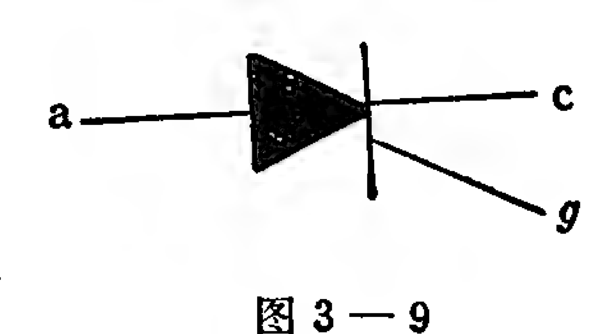


图 3—9

首先，我们看图 3—10(a)，当可控硅阳极经灯泡接电源 Ea 的正极，阴极接Ea 的负极（称为正向阳极电压），控制极经开关 K 接电源 Eg 的正极，阴极接 Eg 的负极（称为正向控制电压），开关 K 未合时，灯泡不亮〔图 3—10(a)〕，说

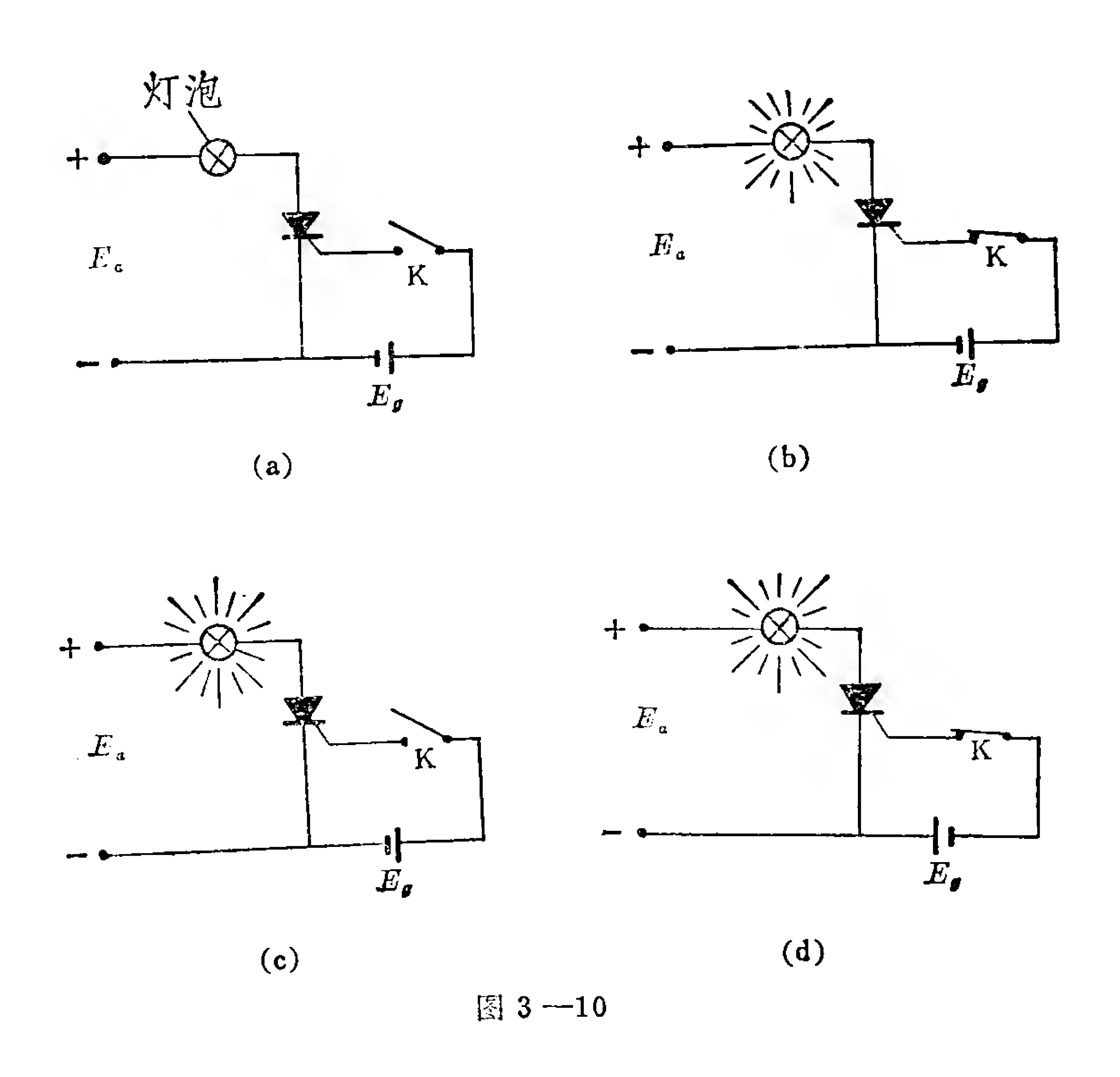


图 3—10

明主回路不通。开关K合上后，灯泡就亮了〔图 3—10(b)〕，说明主电路已通。如果此后打开K，灯泡仍继续亮着〔图 3—10(c)〕，甚至将控制电压 Eg 反接，灯泡也不会熄灭〔图 3—10(d)〕。说明主电路已经导通以后，控制电压就对可控硅失去控制作用。要使灯泡熄灭，必须把电源 Ea 降低到一定数值，或者使电路断开。

下面，我们再来看图 3—11。当可控硅阳极经灯泡接电源 Ea 的负极，阴极接正极时（此时称为反向阳极电压），

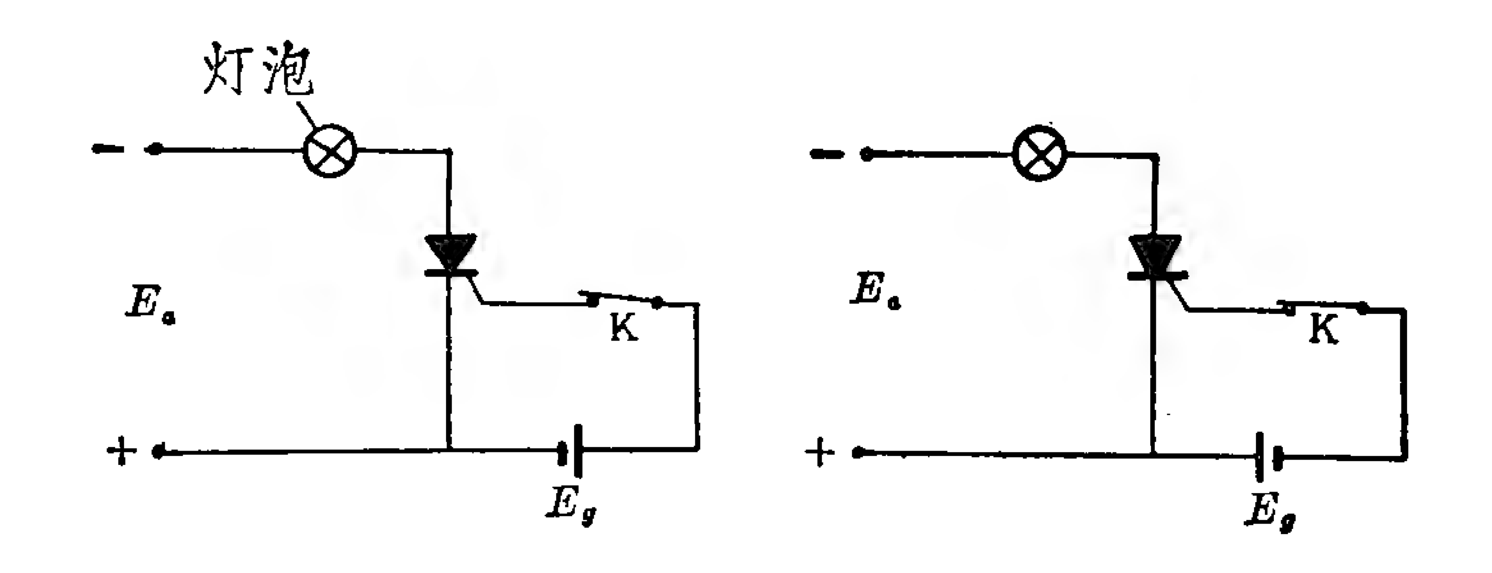


图 3—11

不管 Eg 极性如何，K 的分合都不能使灯泡发亮，这说明可控硅在反向阳极电压下，电路是不通的。

在上面两个图形中，可控硅实际上就是一个可以控制电路开合的一个无触点开关。从上面两个试验我们知道，要使可控硅导通，必须同时具备两个条件，即：（1）可控硅加上正向阳极电压，（2）加上适当的正向控制电压。两个条件缺一不可。

明白可控硅工作原理以后，我们就可以来分析主回路的工作情况。在图 3—8 中，电源是交流电压，即电源的正、负极性在反复交变，而可控硅只能在正向阳极电压下才能导通。也就是说，当电源电压为正半波时，a 点（即b 点)为正极，c 点为负极，可控硅可以导通，相当于开关闭合，电源与串激电动机接通。而当电源电压为负半波时，a 点（即 b 点）为负极，c 点为正极，此时为反向阳极电压，可控硅不能导通，相当于开关断开，电源不能与电动机接通。因此，由于可控硅串联到电动机回路中以后，电源只可能在正半波时

与电动机回路接通，而在负半波时，电源是不可能与电动机接通的。如图3—12所示，这相当于负半波不存在了。因此，串激电动机虽然在交流电压下工作，但电动机中流过的只能是一个单方向的电流，这个情况与在直流电源下工作时类似。

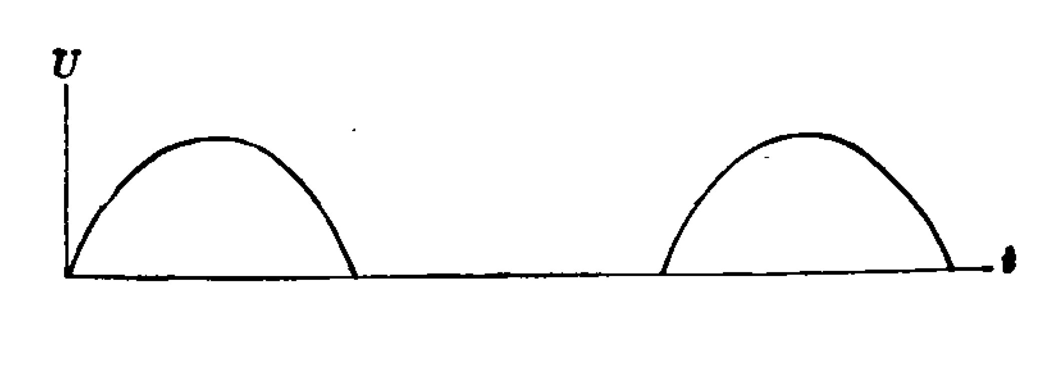


图3—12

上面我们谈到，只有在电源电压为正半波时，即正向阳极电压时，可控硅才能导通。但是否一定导通还得看第二个条件是否具备，即是否还有适量的正向控制电压。

二、控制回路

控制回路又称触发回路，它主要由可变电阻R与电容C串联起来所组成。下面我们来分析控制回路是如何来控制电动机转速的。

在可控硅已处于正向阳极电压的情况下（即a点正、c点负），如果可控硅尚未导通，这个电压也施加到R—C串联回路上，于是电容器开始充电，电容器电压逐渐升高。从图3—8可以看出，电容器电压就施加到控制极上。由于a点与g点相联，c点与f点相联，g、f的极性应分别与a、c相同，即g为正，f为负。也就是说，当阳极上是正向电压时，控制极上也是正向电压。当电容器充电到一定程度，即控制极上的正向电压达到一定数值后，可控硅被触发而导

通。从上面的分析我们可以看到，可控硅导通的快与慢，是由电容器电压上升的快与慢所决定的。如果电容器电压上升得快，控制极上到达所必须的正向控制电压也快，可控硅能及早的导通〔图 3 —13(a) 阴影部分〕，此时电动机通电的时间长，电动机上施加的平均电压高，它的转速也就高。如果电容器电压上升过程慢，控制极达到所需的正向控制电压也慢，可控硅导通时间就晚〔图 3 —13(b)〕。此时，电动机通电的时间短，电动机上所施加的平均电压低，电动机的转速也就低。因此，电动机转速的高低是由电容器电压上升的快慢来决定的。那电容器电压上升的快慢又由什么来决定呢？由可变电阻 R来决定。电阻 R大，电流流入电容器比较困难，也就是电容器充电过程慢，电容器电压的上升过程也就慢，可控硅导通时间就晚，电动机转速就低。反之，如果电阻 R

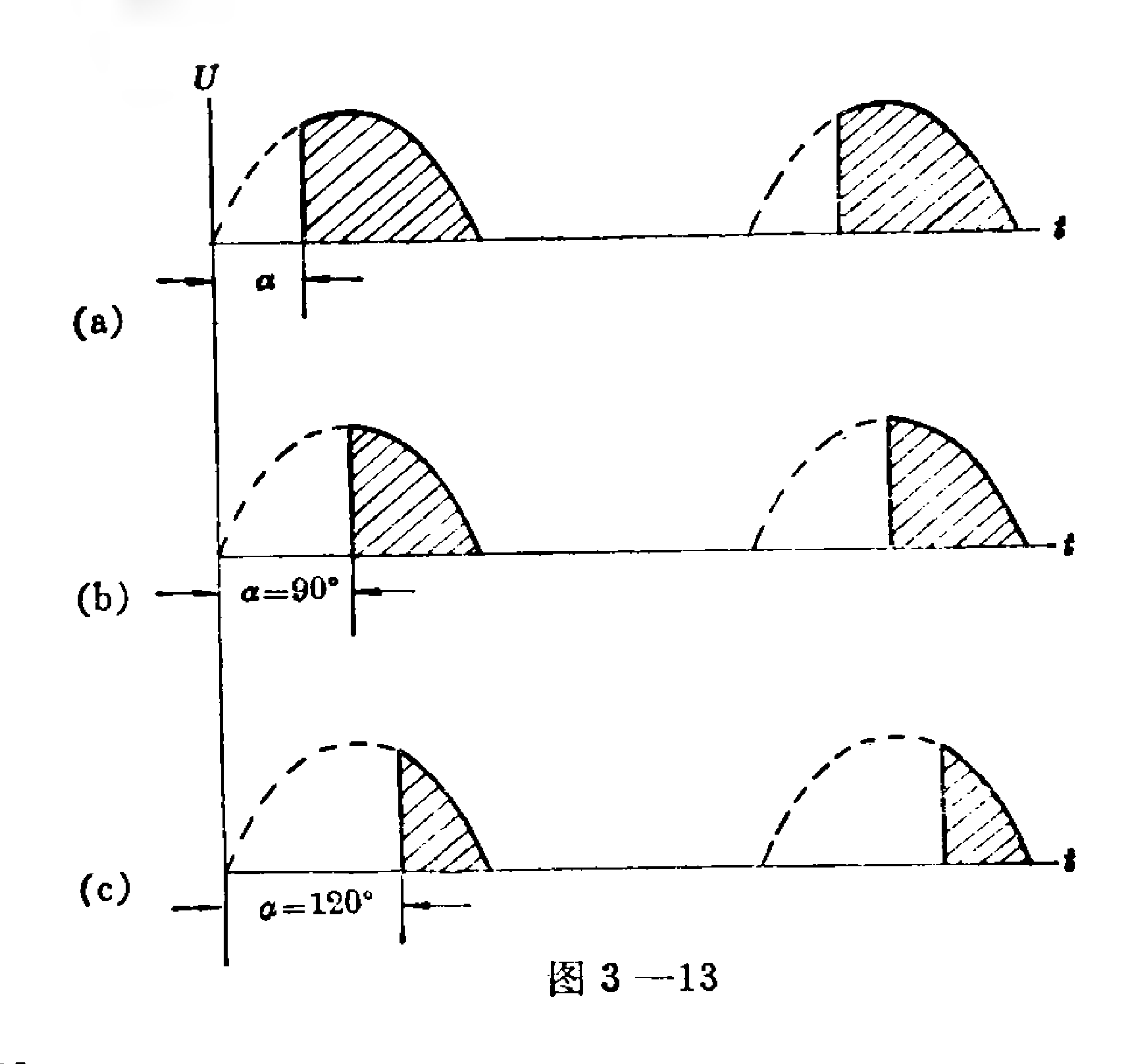


图 3 —13

小，电流流入电容器比较容易，也就是电容器充电过程快，电容器电压上升快，可控硅导通时间就早，电动机转速就高。所以，只要改变可变电阻R的大小，就可改变可控硅的导通时间，也就是改变了电动机的转速。因此这种调速方法，线路简单，操作方便。

在图3—13中，可控硅不导通的时间称为控制角α。控制角α越大，可控硅导通时间越短，施加到电动机上的平均电压就越低，电动机的转速也就越慢。不同控制角时，串激电动机的机械特性曲线如图3—14所示。

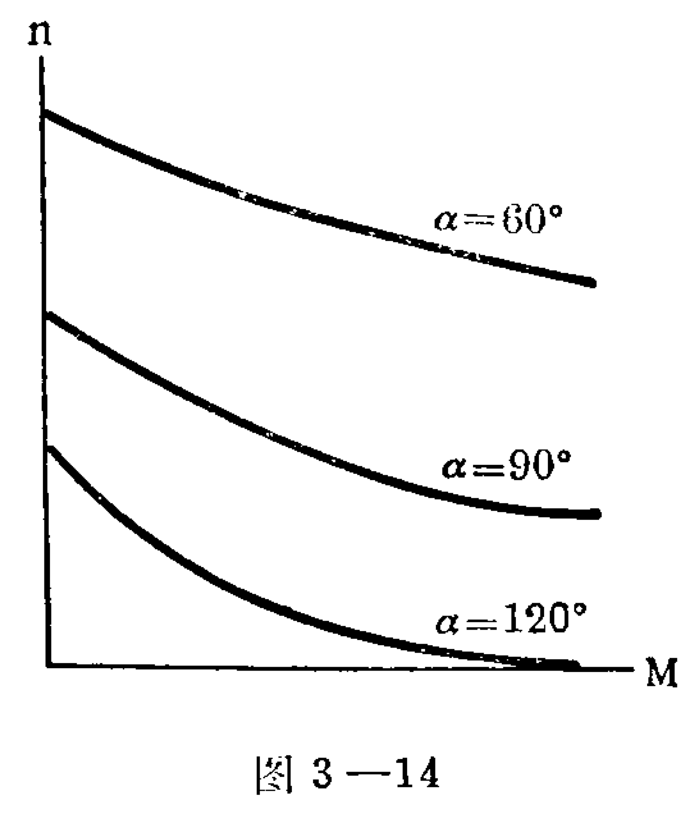


图3—14

应当指出，利用可控硅线路，可以实现电机的无级调速，但这种调速方法也有它的缺点，并不能完全代替齿轮变速。因为式2—22告诉我们，电机转轴上所输出的机械功率是正比于转速的。利用可控硅线路可以直接降低电机本身的转速，但电机本身的转速降低之后，它所能输出的机械功率便正比例的减少，有可能带不动负载。而用齿轮变速时，电机本身的转速并不降低，电机的功率不会减少，这方面的优点又是可控硅调速所无法比的。因此，两种调速方法各有所长，所以目前常将可控硅调速与齿轮变速结合起来用于电动工具上，这样既可以实现分挡无级调速，又可使功率不致于减少过多。

第四章　交流串激电动机的绕组

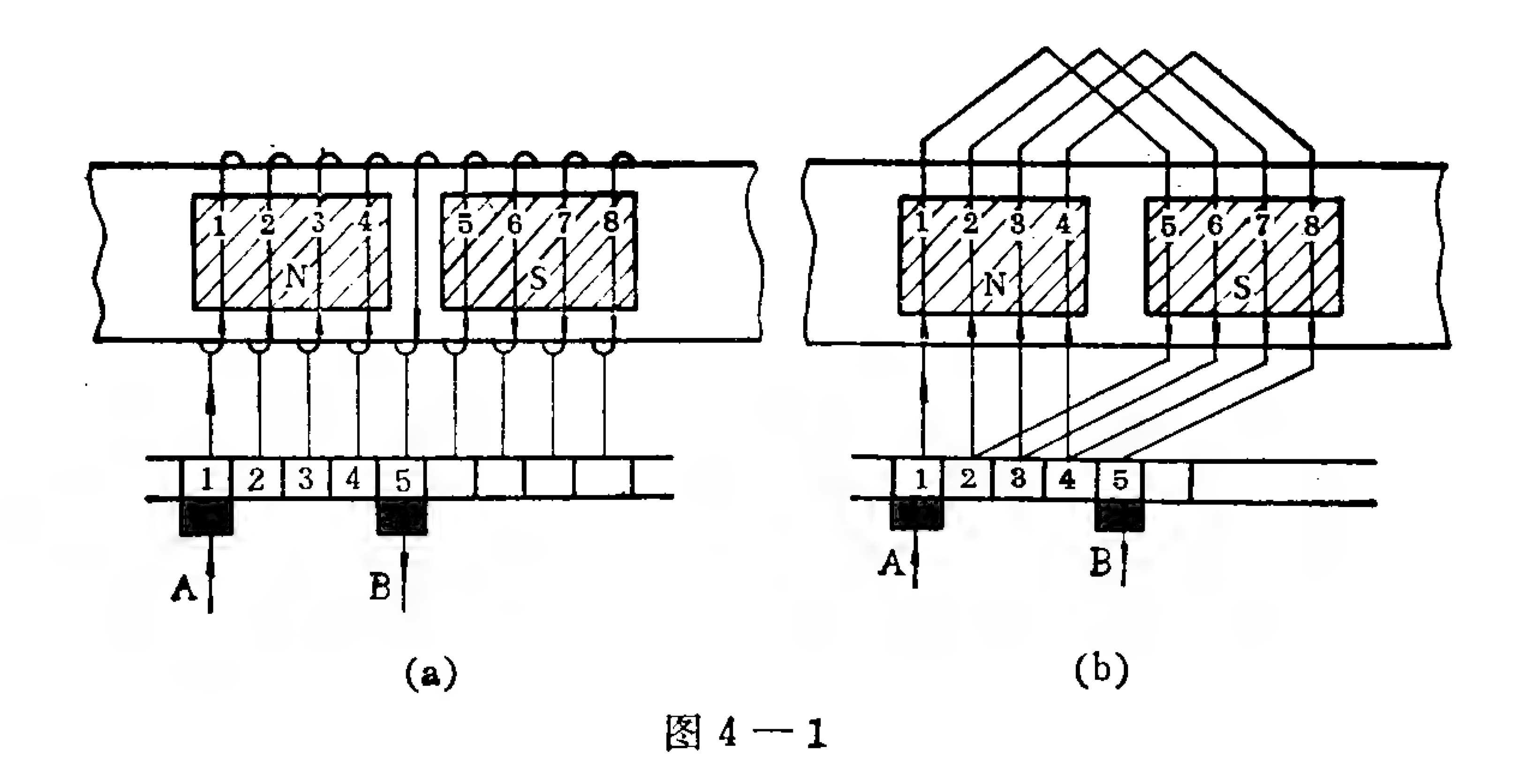
4—1　概　　述

同所有其它电机一样，串激电动机的定、转子绕组也是最重要的部件之一。匝数的多少、线径的粗细等，都会对电机各方面的性能产生重大影响。尤其是转子绕组，在工作时处于旋转状态之下，是电机中极易损坏的部件之一，所以应特别的重视。

为了便于进一步说明绕组的构成方法，首先必须研究一些术语的定义。

一、环形绕组与鼓形绕组

图 1 — 1 表示的绕组，称为环形电枢绕组。在环形电枢



(a)　　(b)

图 4 — 1

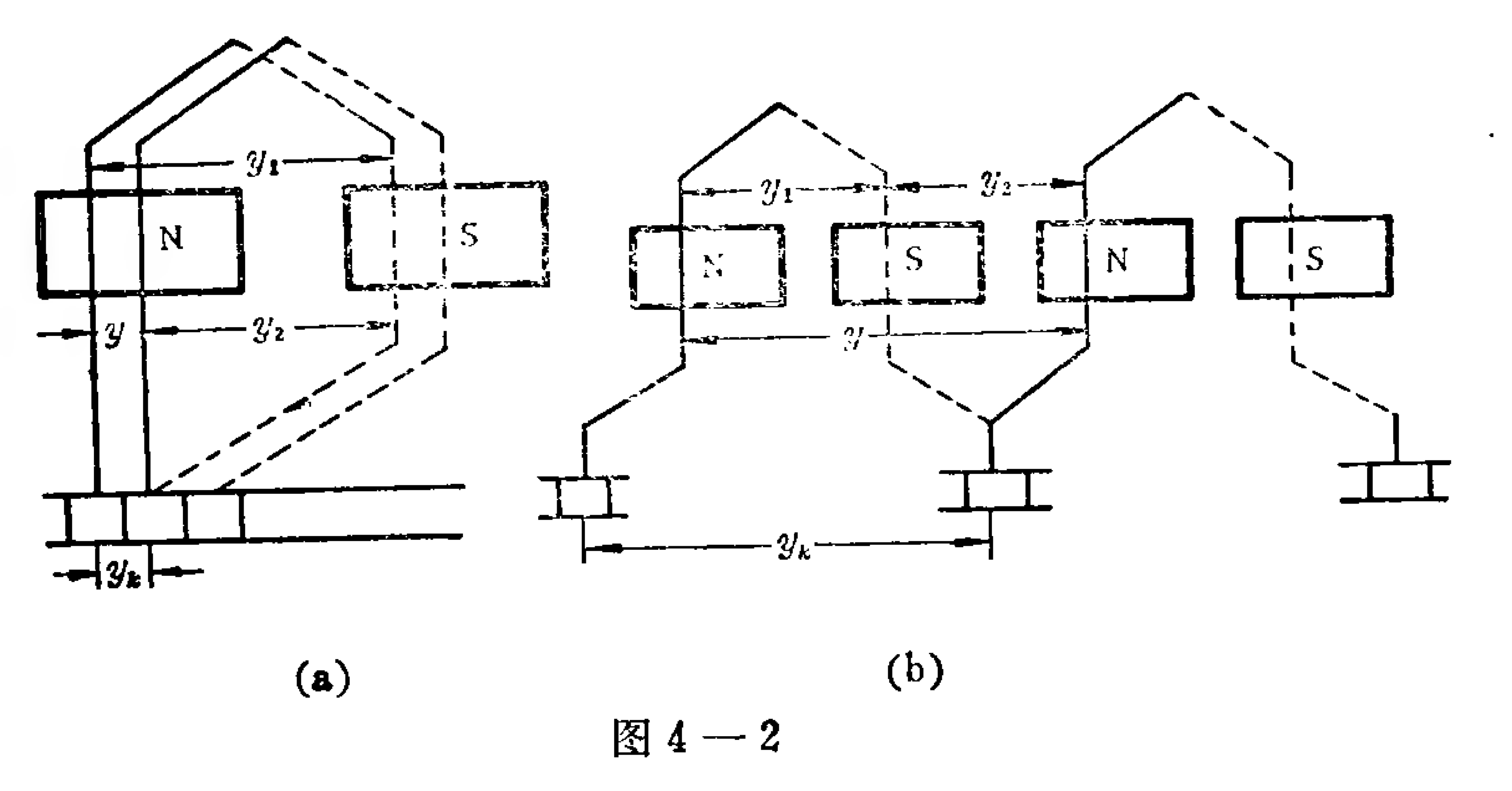
绕组中，一部分导体位于圆环的外表面，另一部分导体位于圆环的内腔。由于圆环内腔实际上没有磁通，故位于圆环内腔的导体不能产生转矩，它仅起连接导线之用，所以环形绕组的利用率较低。

近代的换向器电机多采用鼓形电枢绕组〔图 4 — 1 (b)〕。实际上，鼓形电枢绕组可以看成是由环形电枢绕组演变而来。在图 4 — 1 中，图(a) 是类似图 1 — 1 环形绕组的一部分，编号为 1 、 2 、 3 、 4 的四根导体位于 N 极下，电流方向向上流动，编号为 5 、 6 、 7 、 8 的四根导体位于 S 极之下，电流方向向下流动。电流由电刷 A 流入，而由电刷 B 流出。如果将这 8 根导体用图(b) 的方法串联起来便得到了鼓形绕组。比较图 4 — 1 (a) 和(b) 可以看出，这两种绕组虽然接法不一样，但电源电流的方向以及每根转子导体电流的方向均未改变，因此，性能是一样的，都可以产生同样大小及相同方向的转矩。在 1 — 1 节中分析工作原理时，利用环形电枢绕组所得到的一些结论，也适用于鼓形电枢绕组。换向器式电机发展到今天，环形绕组早已淘汰，在 1 — 1 节中以环形绕组为例来分析工作原理的目的，只是由于它比较简单，容易接受而已。

由于鼓形电枢绕组比较省材料，制造工艺也方便，因此得到广泛的采用，有关鼓形电枢绕组的具体绕制方法，将在 4 — 2 节中介绍。

二、迭绕组和波绕组

同其它类型电机一样，串激电动机转子绕组的线圈也可能存在两种不同的联接方法（图 4 — 2 ）。在图 4 — 2 (a) 中，相邻联接的两个线圈互相重迭，这种绕组称迭绕组。在



(a)　　　　(b)

图 4 — 2

图 4 — 2 (b) 中，相邻联接的两个线圈成波浪形，这种绕组称为波绕组。根据直流电机绕组理论我们知道，这两种类型绕组性能上的最大区别是并联支路数。波绕组的并联支路数永远等于 2 ，迭绕组的并联支路数则等于磁极数（证明略）。对两极电机而言，不论是波绕组还是迭绕组，并联支路数都等于 2 ，性能上就没有什么差别，采用那种绕组都一样。在生产实践中两极电机都采用迭绕组。由于小型串激电动机绝大多数是两极的，因此，下面我们只介绍迭绕组。

在制造转子绕组时，都是先把线圈一个个绕入电机槽中，然后再照 4 — 2 节所介绍的方法，把线圈与换向器联接起来而组成了绕组。由于线圈是组成绕组的元件，所以也称为绕组元件。小电机中都是多匝元件，即一个元件由好多匝所组成。但为了图形的清晰，在画绕组图时，我们都是以单匝元件来表示的(图 4 — 2)。

三、绕组节距

为了能顺利地画出绕组展开图，必须先决定绕组的节

距。图4—2所表示的绕组存在着下面四种节距。

1. 第一节距。也称为后节距，它是一个元件两边之间的距离，通常用y_1来表示。根据y_1数值的大小，可以将元件区分为全距元件及短距元件，它们的定义如下：

沿着转子外圆，两个磁极之间的距离称为极距，通常用τ来表示（图4—3）。如果第一节距$y_1=\tau$，称为全距元件。如果$y_1<\tau$，则称为短距元件。在生产实践中，为了改善换向削弱火花，希望采用短距元件（理由见5—3节）。在同样大小电流下，希望生产较大的转矩，又最好是采用全距元件（理由见4—3节）。这两方面是矛盾的，为了能同时照顾到这两方面性能上的需要，往往采用接近于全距的短距元件。

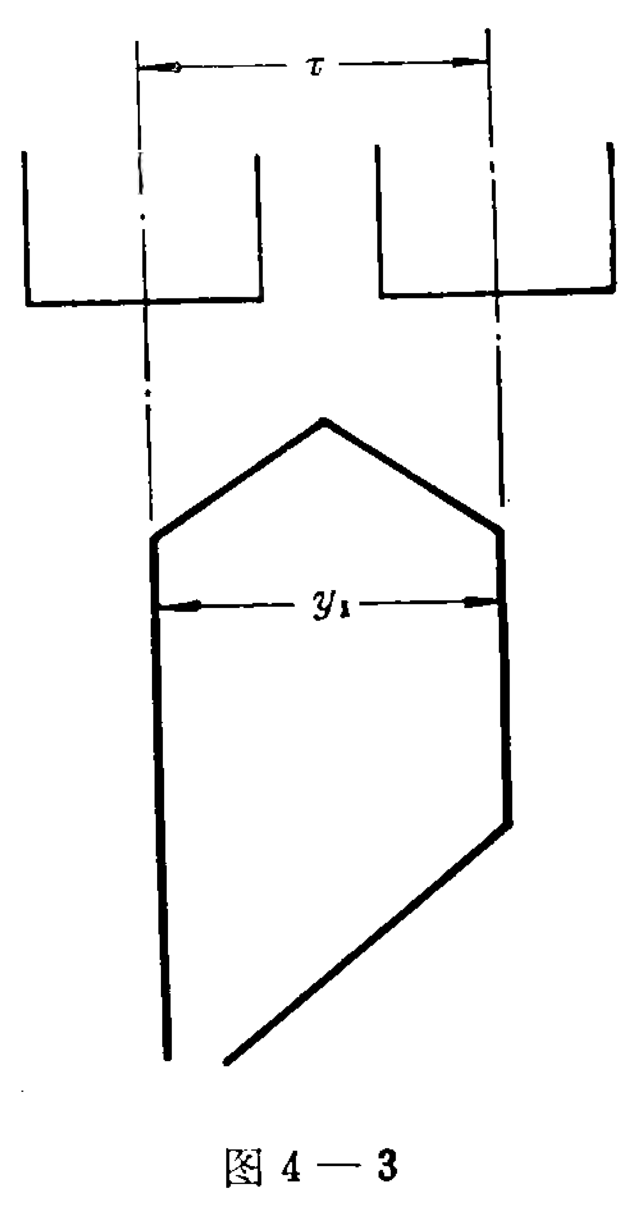


图4—3

2. 第二节距。也称前节距，它是某一元件的第二边和相邻联接元件的第一边之间的距离，通常用y_2来表示。

3. 合成节距。它是两个相邻联接元件对应边之间的距离，通常用y来表示。

4. 换向器节距。它是相邻联接的两个元件的始端在换向器上所跨过的距离，通常用y_k来表示。

从图4—2(a)可以看出，在四种绕组节距之间存在着

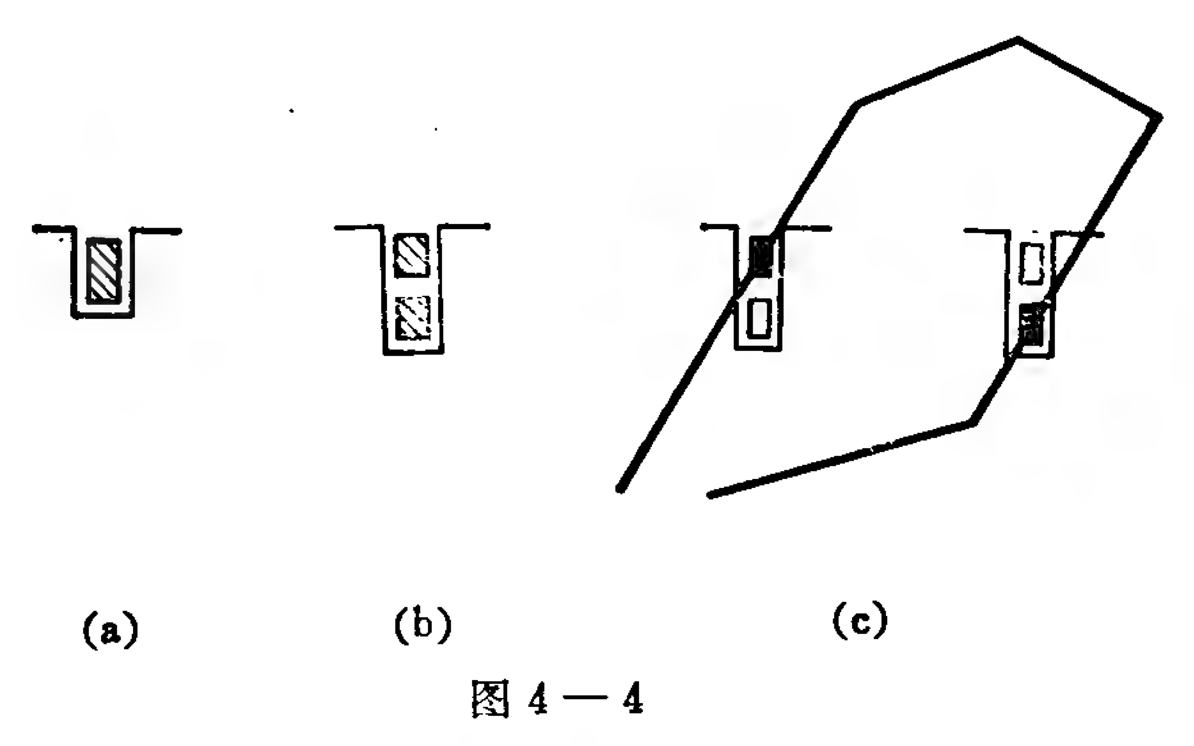
下列关系，即：

$$y = y_k \qquad 4—1$$

$$y = y_1 - y_2 \qquad 4—2$$

四、双层绕组与虚槽数

我们知道，异步电机的绕组有两种基本型式，即单层绕组与双层绕组。单层绕组是指槽中只有一层元件边的绕组〔图 4—4 (a)〕。双层绕组是指槽中有两层元件边的绕组〔图 4—4 (b)〕。对交流电机而言，这两种绕组各有它的优缺点，都有它的适用范围。但对换向器式电机而言，却毫无例



(a)　　(b)　　(c)

图 4—4

外的都采用双层绕组。一般情况下，采用双层绕组时，总是将元件的两条边分别放置在槽的上层和下层。但对小容量串激电动机而言，却往往不遵守这个原则。

下面我们再来分析虚槽数。

对于带有换向器的电机绕组，为了理论阐述上的方便，往往将一个实槽分成几个虚槽。所谓虚槽，是指一个上层元件边和一个下层元件边所组成的一个单元槽。在图4—5(a)中一个实槽等于一个虚槽；在图(b) 中一个实槽分成两个虚

槽；在图(c) 中一个实槽分成三个虚槽。在生产实践中，一般情况下，都是将一个实槽分成两个或三个虚槽。一个实槽分成两个或三个虚槽，就是说，一个实槽中有两个或三个元件边并列。一个实槽中的并列元件数用符号 U_Z 来表示，最常见的情况是

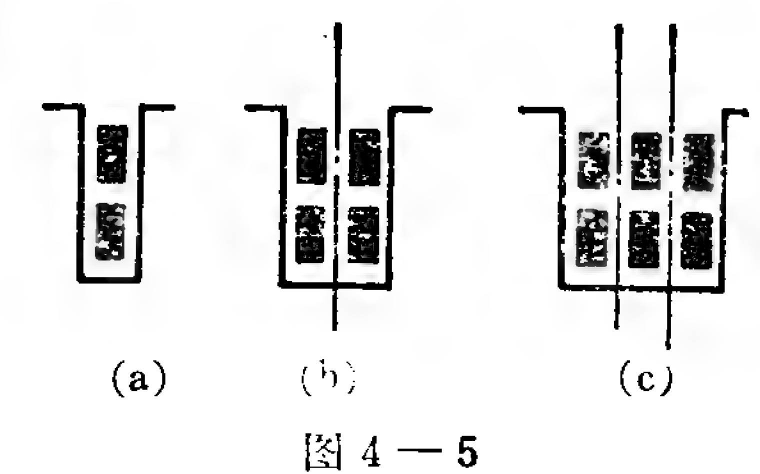


图 4—5

(a) 一个实槽等于一个虚槽

(b) 一个实槽等于二个虚槽

(c) 一个实槽等于三个虚槽

$$U_Z = 2 \text{ 或 } 3 \qquad 4-3$$

U_Z 太大或太小都是的不利，这个问题我们在 5—3 节中再来分析。如果 Z表示实槽数，Z_d 表示转子上总的虚槽数，显然

$$Z_d = U_Z Z \qquad 4-4$$

由于每一个元件有两个元件边，每个换向器片也连接着两个元件边〔图 4—1 (b)〕，而每两个元件边即相当于一个虚槽（图 4—5），因此，绕组的元件数 S、换向器片数 K 与虚槽数 Z_d，三者应该相等，即

$$S = K = Z_d \qquad 4-5$$

将式 4—4 代入式 —5 得

$$K = Z_d = U_Z Z \qquad 4-6$$

或

$$U_Z = \frac{K}{Z} \qquad 4-7$$

从式 4—7 可以看出，由于一个实槽中的并列元件数 U_Z 一定是一个整数，因此任何带有换向器电机的转子，当然也包

括串激电动机在内，换向器片数K与实槽数Z一定是一个简单的倍数关系，这个倍数就是一个槽中的并列元件数。

绕组的节距都不用实际距离或角度来表示，而是用虚槽数或换向器片数来表示，例如在图4—2(a)中：

$$y = 1 \text{ 个虚槽}$$

$$y_K = 1 \text{ 个换向器片}$$

$y = y_K = 1$ 的迭绕组，称为单迭绕组。$y = y_K = 2$的迭绕组，称为双迭绕组。由于小容量串激电动机只采用单迭绕组，所以我们只对这一种绕组形式进行分析。

4—2 单迭绕组构成原理

我们用一个例题来研究单迭绕组的绕制方法，数据是：两极电机，即 $2p = 2$，换向器片数K、元件数S、虚槽数 Z_d 均等于8，即 $K = S = Z_d = 8$。

从图4—2(a)可以看出，对单迭绕组而言

$$y = y_K = 1$$

假定我们采用全距绕组，因此

$$y_1 = \tau = \frac{Z_d}{2p} = \frac{8}{2} = 4 \text{（个虚槽）}$$

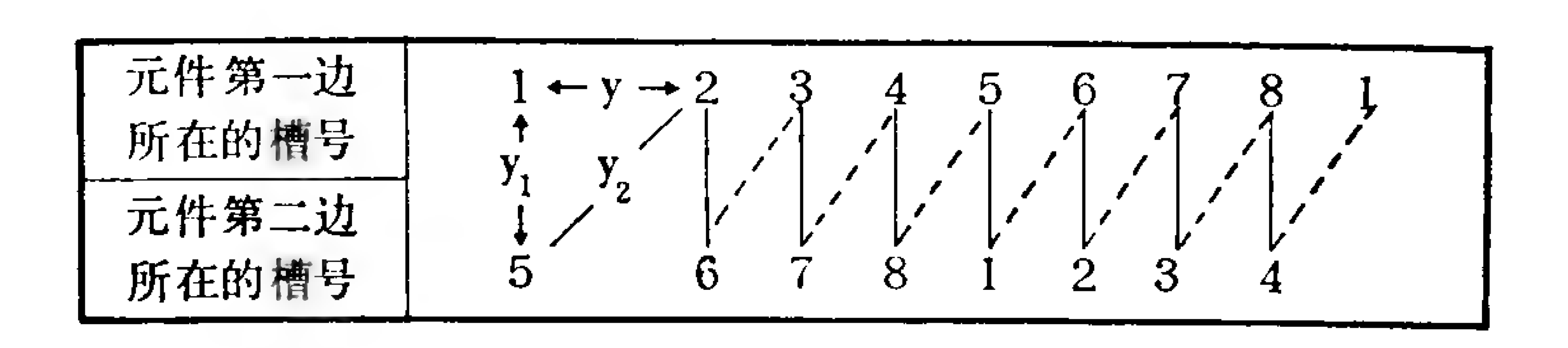
从式4—2可得

$$y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3 \text{（个虚槽）}$$

根据 $y = 1$、$y_1 = 4$、$y_2 = 3$ 这三个条件，可以编制单迭绕组绕线表（表4—1）。在表中上面一行数字是表示元件第一边所在的槽号，同时也表示每个元件的编号。下面一行的数字，表示元件第二边所在的槽号。根据 $y_1 = 4$ 可知，一个元件两边之间所间隔的距离是4个虚槽，因此元件1的第一边

放在第一槽中，它的第二边必在第5槽中，因为1+4=5。同理，第2个元件的第一边在第2槽中，它的第二边必在第6槽中，因为2+4=6。所以在表中：1—5、2—6、3—7、4—8……之间用实线连接起来，它们代表着一个元件。再根据 $y_2=3$ 可知：某一个元件的第二边和相邻连接元件的第一边之间所跨过的距离是3个虚槽，所以在表中，2—5、3—6、4—7……之间用虚线连接起来，它们表示元件之间的串联次序。同时由于 $y=1$，所以相邻连接的元件依次相距一个虚槽。按照上面的方法把所有的导体连接起来，最终会回到起始的边，绕组成为一个闭合回路。

表4—1　单迭绕组导体连接次序表 $y=1$、$y_1=4$、$y_2=3$。



元件第一边所在的槽号	1	2	3	4	5	6	7	8	1
元件第二边所在的槽号	5	6	7	8	1	2	3	4	

表4—1已经告诉了我们转子上导体之间的串联次序，但为了更形象地说明问题，我们最好看转子绕组的展开图（图4—6）。在图4—6中，我们将电枢圆周展开成平面，由于 $K=Z_d=8$，我们画出了这个电机的8个虚槽及8个换向器片。并将槽和对应的换向片依次编号。在每个虚槽中，实线表示元件第一边，虚线表示元件第二边。第一个元件的首端接到换向器片1上，它的第一边放在第一号槽中，第二边放在第五号槽中，两个元件边相隔 $y_1=4$ 个虚槽，

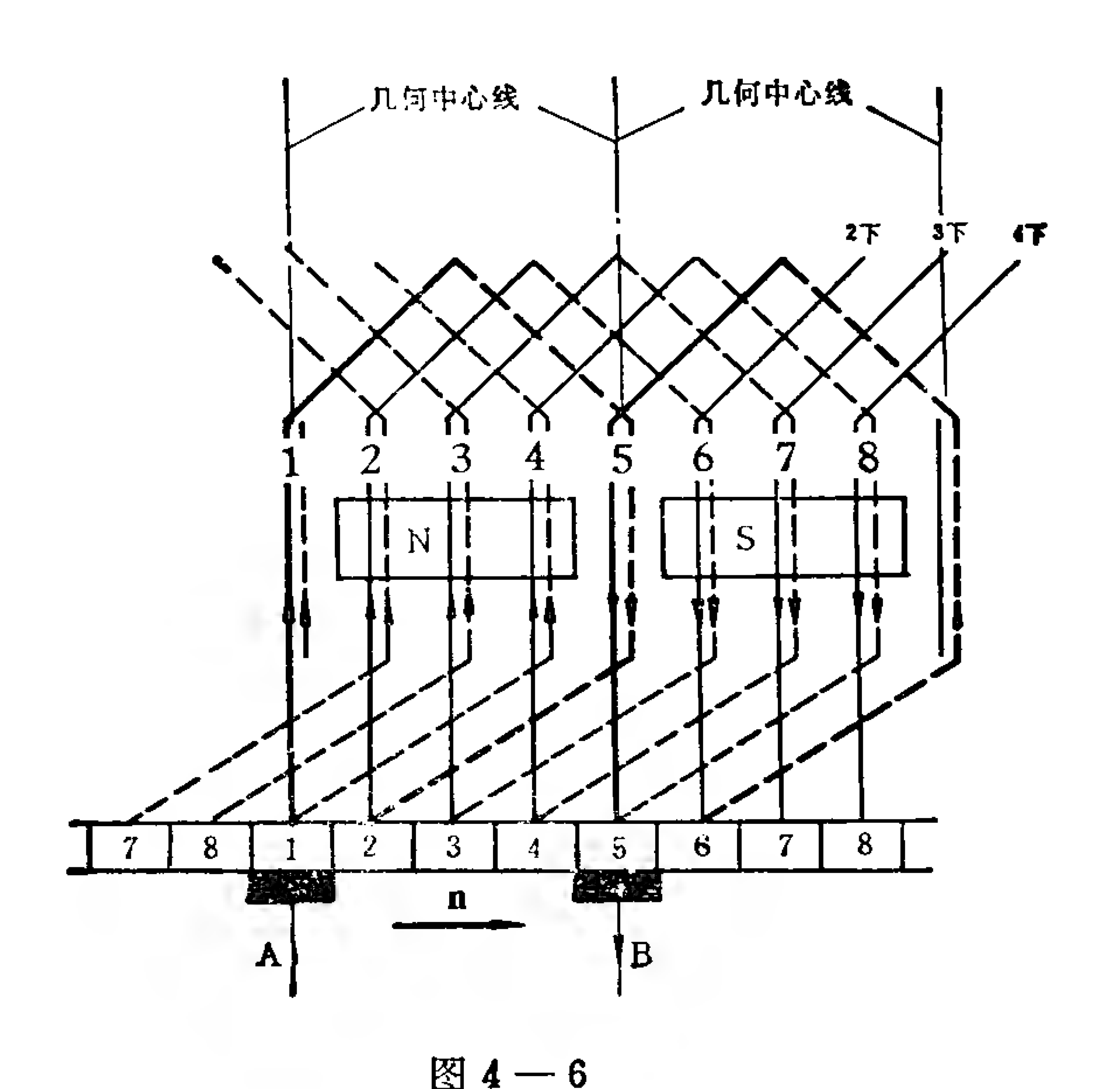


图 4—6

元件的尾端接到换向器片 2 上。第二个元件的首端接到换向器片 2 上，它的第一边放在第二号槽中，第二边放在第六号槽中，元件的尾端接到换向器片 3 上。第三个元件、……这样依次接下去，最后到第八个元件尾端接到换向器片 1 上，组成一个闭合回路。比较表 4—1 及图 4—6 可以看出，它们所表示的转子导体之间的连接次序是一样的。

在展开图中还必须同时画出磁极及电刷的位置。方法是这样的：在我们所研究的例题中，由于是两极电机，因此，把电枢圆周分成两等分，在每一等分内放置一个磁极，磁极的宽度约等于 (0.6—0.7)τ左右，两个磁极均匀分布。在安置磁极时应该注意到：由于电枢是旋转的，因此元件和磁极

的相对位置在不断变化，图上所表示的只不过是某一瞬间的情况。在1—1节中我们曾经提到为了产生最大的电磁转矩，电刷的位置应该与位于几何中心线处的导体相接触。在图4—6所表示的瞬间，元件1和5它们都位于几何中心线上，因此电刷与这两个元件相接触。

下面我们进一步研究图4—6所表示的绕组展开图如何产生电磁转矩。

假定电流从电刷A流入而从电刷B流出。电流从电刷A流到换向器片而后进入电枢绕组，在电枢绕组内部电流分两路流动。一路是电流从电刷A到换向器片1，经过元件1—2—3—4，到换向器片5，从电刷B流出。一路是电流从电刷A到换向器片1，经过元件8—7—6—5到换向器片5，再从电刷B流出。图4—7是这两个并联电路的示意图。根据上述电流流动方向，我们知道：所有位于N极下转子导体的电流方向都向上，所有位于S极下转子导体的电流方向都向下。假定N极磁通是流出纸面，S极磁通是流入纸面。则在图4—6所表示的电流及磁通方向情况下，根据电动机左手定则可以判断出：不论是N极还是S极下，转子导体所产生的转矩方向都是从左向右（图4—6），于是电机便旋转起来，成为一台电动机。

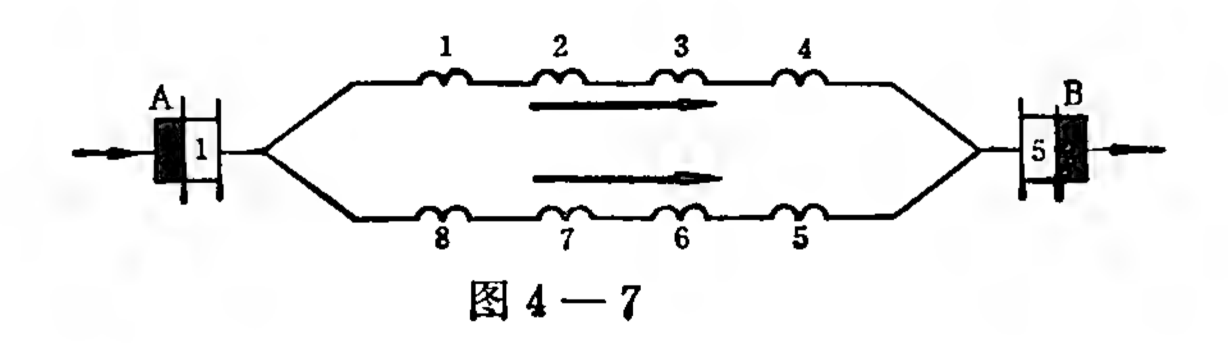


图4—7

4—3 单迭绕组的实用形式

一、短距元件

为了理论阐述上的方便，在图4—6中，是以全距元件为例来说明单迭绕组的构成方法的。但在生产实践中并不采用全距元件，而是采用短距元件。短距元件的优点是可以改善换向、削弱火花，这个理由我们将在5—3节中进行分析。短距元件的缺点是削弱了电磁转矩，下面我们就以图4—6的例题来解释这方面的道理。

在图4—6中极距 $\tau=\frac{Z_d}{2p}=\frac{8}{2}=4$个虚槽。对短距元件而言，线圈节距 $y_1<\tau$，如果令 $y_1=3$ 个虚槽，按照图4—6的方法重新绘制绕组图形即可画出图4—8所表示的短距元件单迭绕组展开图。比较图4—6和图4—8可以看出，两个图形基本上是一样的，只要把图4—6中每个元件的第二边（此时 $y_1=4$个虚槽）向左移动一个虚槽，即可得到图4—8所表示的短距元件展开图（此时 $y_1=3$ 个虚槽）。电流进入电枢绕组后，也仍然分成两路。一路电流从电刷A到换向器片1，经过元件1—2—3—4到换向器片5，从电刷B流出。一路电流从电刷A到换向器片1，经过元件8—7—6—5到换向器片5，再从电刷B流出。这与图4—6所表示情况是一样的。但由于元件短距的结果，极面下转子导体电流的分布情况与图4—6却有了区别。在图4—6中，同一个极面下所有转子导体电流的方向都是一样的。例如N极下每根导体电流方向都向上，这样每根导体所产生的电磁力的方向也是一样的。但在图4—8中，同一个极面下

转子导体电流方向就不一样了，例如N极下第四槽中上、下层导体电流方向就相反。由于在同一个极面下，部分导体的电流方向相反，它们产生电磁力的方向也相反。电磁力部分抵消的结果，总的电磁转矩就减少了。所以我们说，短距元件虽然可以改善换向，削弱火花，但过分的短距却会削弱电磁转矩。为了同时照顾这两方面的需要，生产实践中都是采用接近于全距的短距元件。

二、电刷的实际位置

在5—3节中我们将分析到，为了改善换向，消灭火花，在小容量串激电动机中，电刷的位置有时逆着旋转方向移动一个角度，这样图4—6中所表示的电刷位置就应改为图4—9(a)所表示的情况。在图4—6中，电刷A与换向器片1相接触，电刷B与换向器片5相接触。电刷A、B所联接的导体，分别是元件1及元件5。在图4—9(a)中，

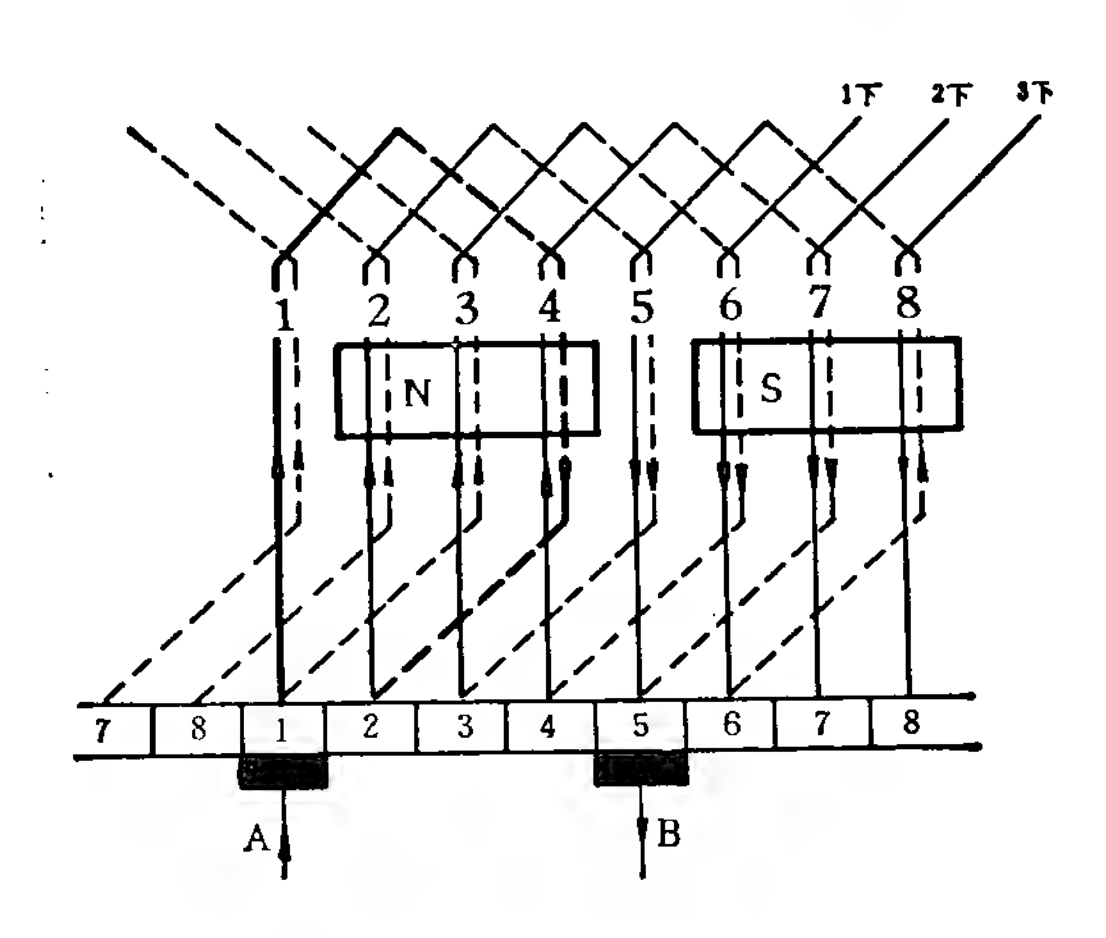


图4—8

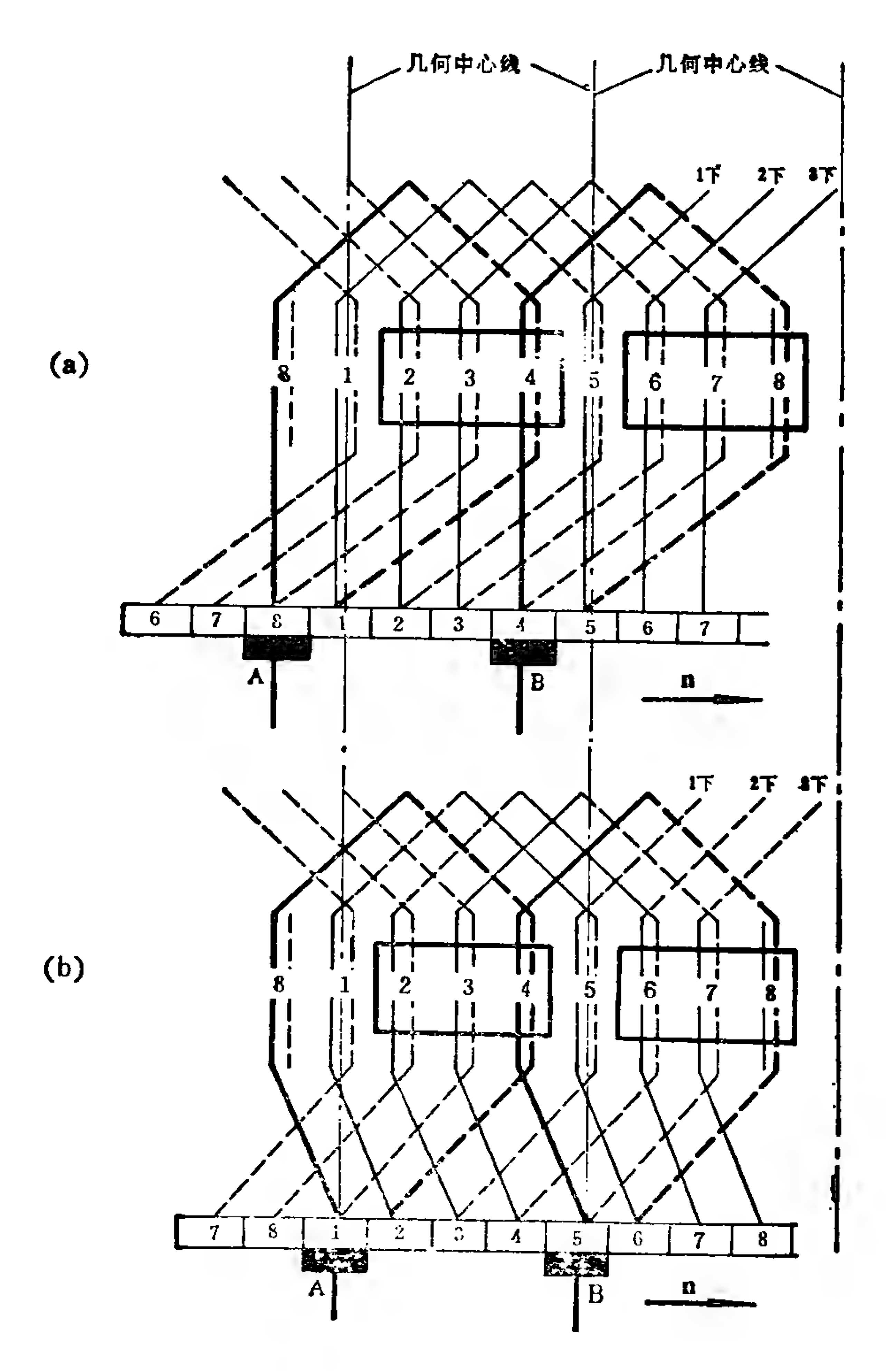


图 4 — 9

电刷 A、B 则分别与换向器片 8 与 4 相接触，也就是说，电刷 A、B 所连接的导 体 分 别 是元件 8 及元件 4 。从下一章

5—3节的分析我们将知道，电刷与元件8及元件4相接触时，换向情况可以得到改善。如果由于结构及制造工艺上的原因，电刷又必须位于几何中心线上，这样图4—9(a)必须演变成图4—9(b)。这两个图形的唯一区别，只是元件与它所联接的换向器片改变了位置，只要将图4—9(a)每个元件到换向器片的焊头位置顺转向斜过一片，即可以得到图4—9(b)。在图4—9(b)中电刷的位置仍然在几何中心线上，但与电刷A、B所连接的元件却是8和4，这与图4—9(a)的情况一样，因此，它也能起到4—9(a)所具有的改善换向的作用。图4—9(b)是生产实践中所经常采用的绕组形式。在附录中，附图—1到附图—8所表示的老系列（J1Z系列）电钻转子绕组，就与图4—9(b)的绕组形式类似。

4—4 单迭绕组实例

在4—3节中，为了说清楚单迭绕组构成的基本原理，我们所举的例子是非常简单的，这个两极电机只有8个元件及8个换向器片。但实际的电机绝不会如此简单。下面以交直流两用串激电动机的实例，来看单迭绕组的构成。这个例子就是老系列电钻中的J1Z—10，电压U＝24、36伏（附录中的附图—2）。它的具体数据是：

槽　数　　$Z=12$，

换向器片数　　$K=24$，

实槽节距　　$y_s=5$，即元件跨距是1—6槽，

两极电机　　$2p=2$。

要画出绕组展开图，首先要计算出这个绕组的有关节

距。由于是单迭绕组，根据图 4 — 2 (a) 可知

$$y = 1 \text{ 个虚槽}$$

$$y_k = 1 \text{ 个换向器片}$$

这个电机的极距为

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{12}{2} = 6 \text{ 个实槽}$$

为了改善换向、消灭火花，应采用接近于全距的短距，所以选用的元件节距为

$$y_s = 5 \text{ 个实槽}$$

由于换向器片数 K = 24，而元件数 S又必须与换向器片数 K 相等，所以元件数 S = 24。12个槽中放了24个元件，显然每个槽中是两个元件并列，这相当于 4 — 5 (b) 所表示的情况，即一个实槽等于两个虚槽。元件节距如果用虚槽数来表示，就应为

$$y_1 = 2 \times 5 = 10 \text{ 个虚槽。}$$

由式 4 — 2 可得

$$y_2 = y_1 - y = 10 - 1 = 9 \text{ 个虚槽}$$

与上面数据相对应的绕组展开图表示在图 4 —10中。在图中粗实线代表着齿，两个齿之间就代表着槽。由于一个实槽等于两个虚槽，所以每个槽中都画了两根实线，两根虚线，实线代表元件第一边，虚线代表元件第二边。第一个元件的一边放在第一号虚槽，它的另一边则放在第11号虚槽，两个元件边相隔y_1 = 10个虚槽。为了改善换向器消灭火花，与第一个元件首端所连接的换向器片 1 ，已顺转向移动了半个换向器片的距离。第一个元件的尾端则接到换向器片 2 。同理，第二个元件的一边放在第二号虚槽，它的另一边则放在第12

号虚槽，两个元件边相隔的距离同样是 $y_1 = 10$ 个虚槽。第二个元件的首端也是顺转向移过半片接到换向器片 2 ，尾端则接到换向器片 3 。第三个元件、……这样依次接下去，最后到第24个元件的尾端接到换向器片 1 上，组成一个闭合回路，得到了这个电机的绕组展开图。

图 4 —10所表示的绕组展开图，线条很多，既不清晰醒目，画图又费时间，必须给予简化。在生产实践中，绕组展开图的功用是指导下线工艺的，它主要告诉我们下面两点内容：（1）一个元件的两边分别嵌放在那两个槽中，（2）一个元件的始端和末端分别与那两个换向器片连接。为了这样两个目的，只要象图 4 —11那样画出展开图的一部分就可以了。在图 4 —11中，粗实线仍然代表着齿，其中的数字则代表实槽的编号。由于槽数 $Z = 12$，换向器片 $K = 24$，即一个实槽对应着 2 个换向器片。例如槽 1 对应着换向器片 1 与 2 ，槽 2 对应于换向器片 3 与 4 ，……槽 7 对应着换向器片13与14，等等。因为12个槽中要放置24个元件，因此一个槽中有两个元件并列。由于元件的实槽节距 $y_s = 5$，即元件跨距是 1 — 6 槽。所以 1 、2 两个元件的第一边放在第 1 槽中，它们的第二边放在第 6 槽中。为了改善换向器、消灭火花，所有元件在换向器片上的焊头位置都顺转向移过半片。所以，元件 1 的首、尾端分别接在换向器片 1 与 2 上。元件 2 的首、尾端分别接到换向片 2 与 3 上。只要把元件 1 与 2 的下线工艺搞清楚了，其它元件的下线方法完全一样。比较图 4 —10及图 4 —11，可以清楚地看出，图 4 —11是图 4 —10的一部分，它既能说明下线工艺，又清晰醒目，因此本书附录中给出的绕组展开图都采用图 4 —11的形式。

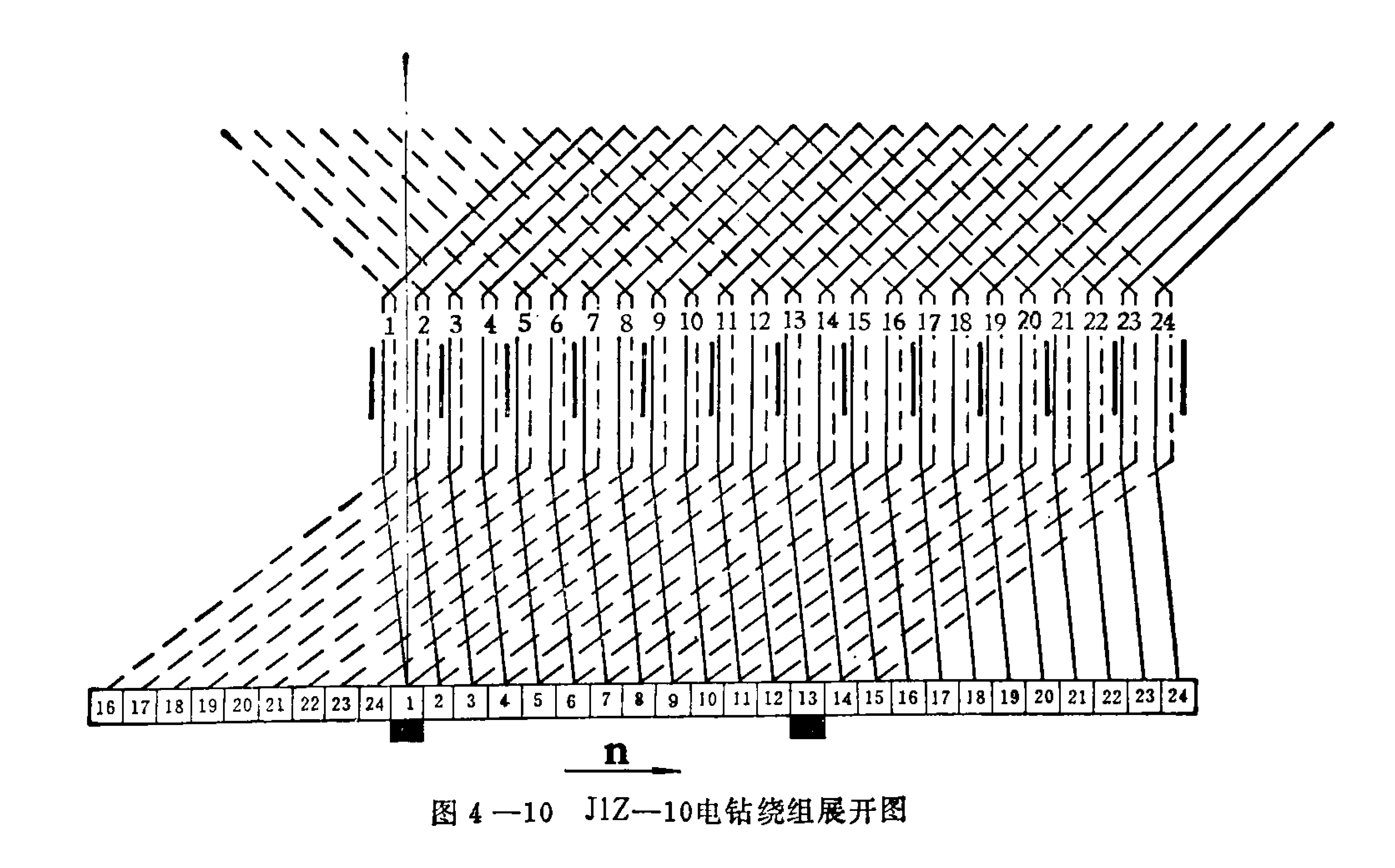


图4—10　J1Z—10电钻绕组展开图

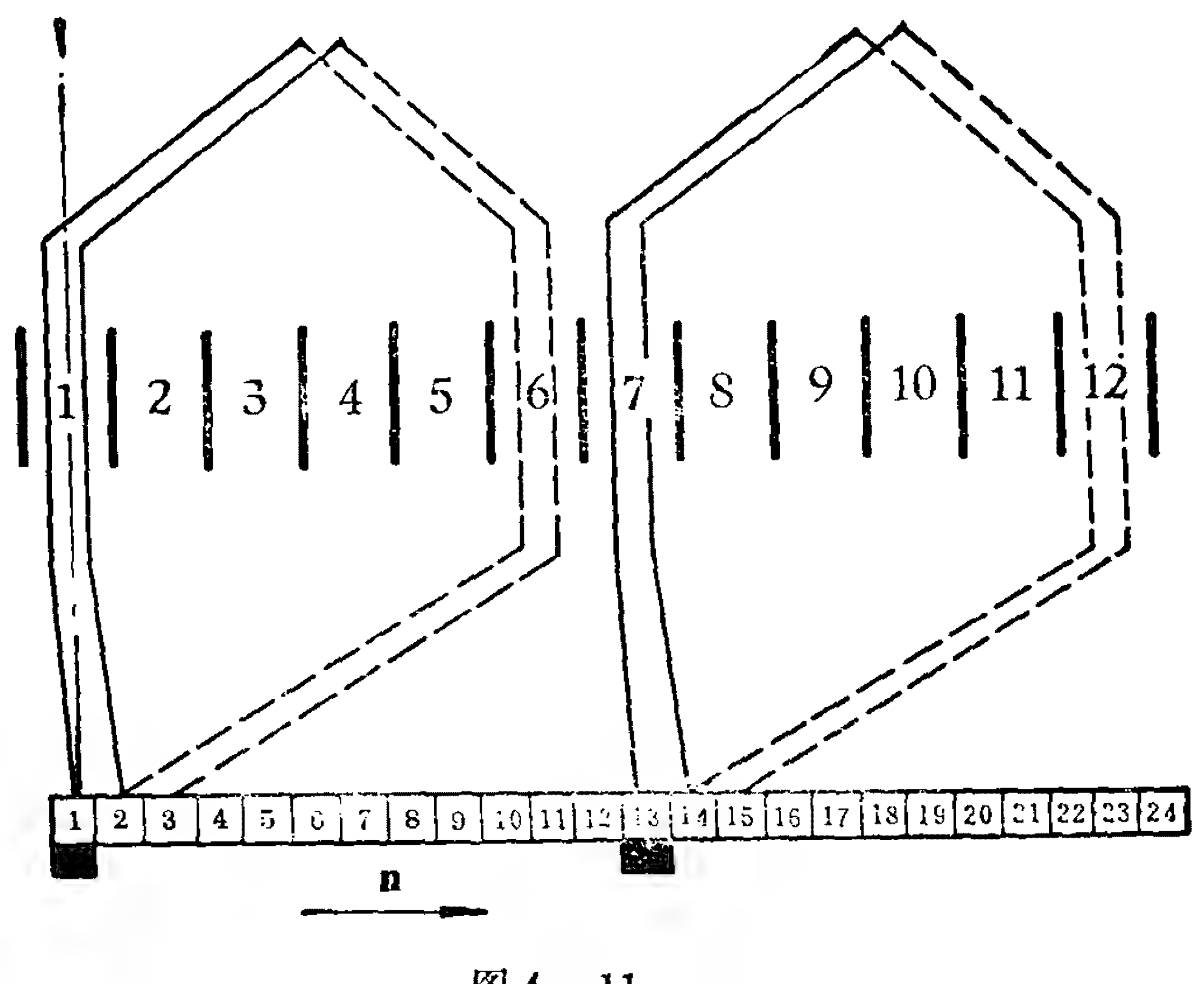


图 4—11

4—5 交流串激电动机转子绕组匝数计算

转子绕组是电机中最重要的部件，机电能量的转换就是通过转子绕组而实现的。但转子绕组又是电机中最易损坏的部件，使用中常常需要进行拆修。在修理串激电机转子时，最好是将原绕组数据详尽地记录下来，因为原设计是经过生产实践的考验而得到的数据，按照原样修复，比较容易保证性能。但在下列情况下，转子绕组也必须进行重绕计算：（1）无名牌电机，原绕组数据遗失。（2）改变电源电压。（3）改变转速。下面我们就介绍交流串激电动机转子绕组重绕计算的一个大概轮廓。

一、转子总导体数 N

式 3 —13告诉我们，交流串激电动机的转子绕组，因切割定子磁通而产生的旋转电势为

$$E=\frac{1}{\sqrt{2}}k_e\phi_m n$$

或

$$E=\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{10^{-8}}{60}N\phi_m n \qquad 4-8$$

根据式 4 — 8 即可解出转子绕组的总导体数 N，即

$$N=\frac{\sqrt{2}\,60}{10^{-8}}\frac{E}{\phi_m n}$$

或

$$N=84.84\times10^{8}\frac{E}{\phi_m n} \qquad 4-9$$

式 4 — 9 告诉我们，只要定出转子绕组的旋转电势 E，定子每极磁通 ϕ_m 及转子转速 n，即可算出转子绕组的总导体数 N。下面我们分别介绍 E、n、ϕ_m 的决定方法。

二、转子绕组的旋转电势 E

图 4 —12是交流串激电动机的相量图（见图 3 — 3），从相量图的几何关系我们知道

$$E+IR=U\cos\varphi \qquad 4-10$$

从式 4 —10可以得到转子绕组的旋转电势为

$$E=U\cos\varphi-IR \qquad 4-11$$

式中：U—电源电压；

cosφ—电机的功率因数；

IR—电机中总的电阻压降。

由于一般情况下，电源电压U ＝220 伏。功率因数cosφ 可以参考附表一1、附表一2、附表一3 及附表一9 选取。因此，在式4 —11中，我们只要将电阻压降 IR 估算出来以后，就可以定出旋转电势 E。下面我们研究IR的估算方法。

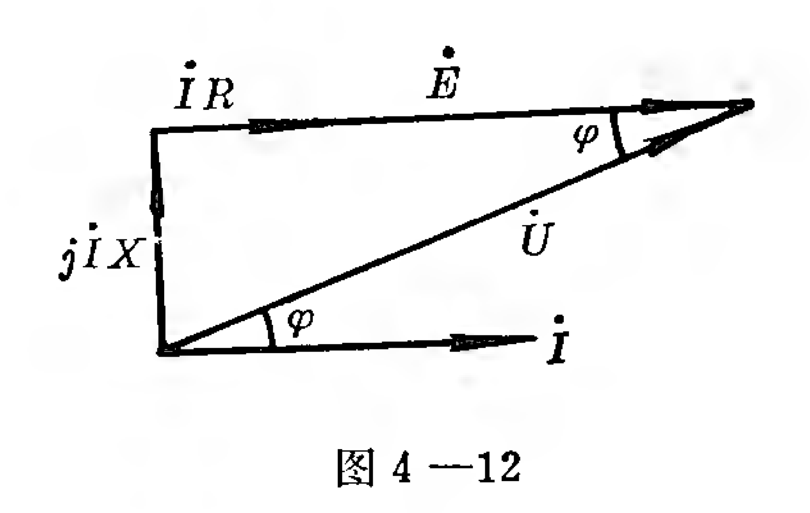


图 4 —12

令 P_1 表示输入的电功率，P_2 表示输出的机械功率。任何电机中，P_1 总是大于 P_2 的，这是因为：电流流过定、转子绕组，要产生铜耗 I^2R；铁心中的磁通交变时，要产生铁心损耗 P_{Fe}；转子旋转以后，由于风扇鼓风及轴承磨擦等，要产生机械损耗 P_Ω。因此，电机中的总损耗为

$$P = I^2R + P_{Fe} + P_\Omega \qquad 4—12$$

根据一般的统计数据，可以近似地认为 $I^2R = P_{Fe} + P_\Omega$，代入式 4 —12后得

$$P = 2I^2R \qquad 4—13$$

输入功率 P_1 中，一部分为损耗 P 所消耗，余下的部分才是输出功率 P_2，因此，

$$P_1 = P_2 + P$$

或
$$P = P_1 - P_2 \qquad 4—14$$

由于损耗消耗掉输入功率的一部分，使得输出功率 P_2 总是小于输入功率 P_1，两者的比值就是电机的效率 η，即：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \qquad 4—15$$

效率的高低是衡量电机性能的一个重要指标。电机的效率越

高越好。从上面分析可以看出，损耗越大，电机效率便越低。将式4—15代入式4—14中，得

$$P=P_1-\eta P_1=P_1(1-\eta) \qquad 4—16$$

将式4—13代入式4—16中，得

$$2I^2R=P_1(1-\eta) \qquad 4—17$$

根据式4—17我们得到电阻压降的计算公式为

$$IR=\frac{1}{2I}P_1(1-\eta) \qquad 4—18$$

根据电工知识我们知道，电机输入功率的计算公式应为

$$P_1=UI\cos\varphi \qquad 4—19$$

将式4—19代入式4—18中，便可以得到电阻压降 IR 的最后表示式，它为

$$IR=\frac{1}{2I}UI\cos\varphi(1-\eta)$$

或

$$IR=\frac{1}{2}U(1-\eta)\cos\varphi \qquad 4—20$$

各种电机的效率 η 及功率因数 $\cos\varphi$，我们可以通过附表—1、附表—2、附表—3及附表—9查到。这样利用式4—20即可估算出各种电动机的电阻压降 IR。

将式4—20代入式4—11，即可得到旋转电势的最后计算公式，

$$E=U\cos\varphi-\frac{1}{2}(1-\eta)U\cos\varphi$$

$$E=\left[1-\frac{1}{2}(1-\eta)\right]U\cos\varphi$$

$$E=\frac{1+\eta}{2}U\cos\varphi \qquad 4—21$$

式中：U—电源电压，伏；

η、cosφ—分别为电机的效率及功率因数。可以利用附表—1、附表—2、附表—3及附表—9，参考尺寸、转速相近的同类型电机选取。

式4—21也可以改写成

$$E = K_e U \qquad 4—22$$

$$K_e = \frac{1+\eta}{2}\cos\varphi \qquad 4—23$$

式4—9告诉我们，要准确地算出转子总导体数N，首先必须准确地定出旋转电势E。而式4—22告诉我们，要准确地定出旋转电势E，则必须准确地算出K_e值。在目前电机所取的电磁负荷情况下，用式4—23计算K_e是足够准确的。以附表—3所列出的电动工具用交直流两用串激电动机为例，用正规设计程序计算出的旋转电势E′，与用式4—22及式4—23估算出的旋转电势E，数值上是十分接近的。具体数据详见表4—2。

表4—2

定子冲片外径（毫米）	φ56		φ71		φ90		
输出功率（瓦）	140	204	275	385	550	770	1250
k_e	0.772	0.772	0.761	0.802	0.771	0.79	0.822
E　（伏）	169.5	169.5	167.5	176	169.5	173.5	180.5
E′　（伏）	164	164	166.5	177	165	175	180

表中：E—用式4—22及式4—23估算出来的旋转电势；

E′—正规程序计算出来的旋转电势。

将 η、cosφ 的数值代入式 4—23 中，即可计算出各种类型电机 K_e 的具体数据。

（1）新系列电动工具用交、直流两用串激电动机（附表—3）

$$K_e = 0.77 \sim 0.82$$

（2）老系列电钻（J1Z）串激电动机（附表—1）

$$K_e = 0.66 \sim 0.74$$

（3）G 系列串激电动机

$$K_e = 0.59 \sim 0.75$$

三、转子转速 n

如果电机或电动工具的名牌尚未遗失，根据名牌即可推算出式 4—9 所需要转速 n 的数值。如果名牌已经遗失，则必须根据电机或电动工具的用途来决定电机的转速了。用途不同，转速高低也不一样。下面仅以电钻及砂轮机为例来分析考虑转速的原则。

1. 电钻转速的决定

根据串激电钻钻削试验得知，一般钻 4 毫米的孔，需施加压力20～25公斤左右。钻 6 毫米孔，需压力30公斤左右。钻10毫米孔，需压力45～50公斤左右。从实际操作得知，一般轻体力劳动者，施加20公斤压力是轻易的，施加30公斤压力是一般的，施加40～50公斤压力则往往要全力以赴。从提高钻削生产率情况看，当电钻转速较低时，增加轴向压力对提高劳动生产率并不显著，但劳动强度却大大增加。而电钻由低速提高到高速时，效果就较显著。如 6 毫米电钻由 850 转/分提高到1400转/分时，施加的30公斤压力不变，劳动生

产率则提高50%。但是高转速又受到钻头寿命的限制。由于串激电钻使用时是不施加冷却液的，钻头的线速度控制在27米/分以下为佳。同时考虑到由于大规格电钻转矩大，在操作使用时高速难以扶持，要适当降低转速，故电钻钻头的转速应参考表4—3的数据选用为好。

表4—3

钻头直径（毫米）	钻头转速（转/分）	钻头线速度（米/分）
4	2200	27.6
6	1200	22.6
10	700	22
13	500	20.4
16	500	25.1
19	350	19.7
23	250	18

根据钻头的尺寸，从表4—3中可以得到钻头的转速，再测出电钻工具中的齿轮速比，就可以推算出电动机的转速了。

2.砂磨工具转速的决定

砂磨工具转速的增高，可以提高加工切削效能。但磨轮圆周线速度过高，离心力将增大，会使磨轮崩裂。因此砂磨工具空载转速均不应超过磨轮圆周线速度的极限值，因此又

不能使砂磨工具的转速过高。各砂轮机名牌空载转速应参考表 4 — 4 中的数据选取。

表 4 — 4

产品名称	砂轮机名牌空载转速（转/分）	砂轮圆周线速度（米/秒）
φ25直向砂轮机	22000	29
φ80直向砂轮机	11000	43
φ100直向砂轮机	8500	44.5
φ125直向砂轮机	6600	43
φ150直向砂轮机	5700	44.7
φ100角向磨光机	11000	57.5
φ125角向磨光机	11000	65
φ180角向磨光机	8000	75.5
φ230角向磨光机	6000	72

参考表 4 — 4，定出了砂磨工具的空载转速以后，再测出它的齿轮速比，即可推算出电动机的空载转速 n_o。但式 4 — 9 中的转速是电动机的满载转速 n。一般情况下，砂磨工具满载转速 n 与空载转速 n_o 之间，存在着下列关系

$$n = 0.65n_o \qquad 4—24$$

四、定子每极磁通 ϕ_m

定子每极磁通的计算公式为（式 2 — 6）

$$\phi_m = B_\delta bl \text{（马）}$$

式中：B_δ——气隙磁密，高斯；

b——定子极弧宽度、厘米（图2—2）；

l——定子铁心长度，厘米；

b、l 可以对电机进行实测。一般情况下，B_δ可在4000～5000高斯范围内选取。B_δ选取的高或低，对电机性能影响极大，而B_δ选取的恰当与否又需要一定的经验，在缺乏经验的情况下，可以参照附表—1、附表—2、附表—3及附表—10中尺寸及转速相近的同类型电机选取。

五、转子每个元件匝数W_Y及每槽导线数N_Z

每两根导线组成一匝，因此转子总匝数为$\frac{N}{2}$。式4—5告诉我们，转子元件数就等于换向器片数K，或者说转子有K个元件，故每个元件匝数便为

$$W_y = \frac{N}{2K} \qquad 4—25$$

式中：N——转子总导线数；

K——换向器片数。

W_y应取一整数，然后修正N值。

每槽导线数N_Z可用下式计算

$$N_Z = \frac{N}{Z} \qquad 4—26$$

式中：N——转子总导线数；

Z——转子槽数。

4—6 转子绕组线径的决定

决定绕组的两个主要因素是匝数和线径。有关交流串激电动机转子绕组的匝数问题，我们已在4—5节中进行了讨论。这一节我们则主要研究转子绕组的线径如何决定。在匝数已初步定下来的情况下，决定绕组线径的大小主要考虑下面三个问题：（1）如果线径取得较小，电阻R就比较大，电阻上的损耗I^2R也就比较大，电机效率较低。这方面的问题，在上一节中已进行了初步分析，这里不再重复。（2）线径小铜耗大的另一个后果，是电机发热，温升较高。小容量电机中，考虑发热的是下面要研究的第一个问题——发热因子。（3）如果线径取得较大，电阻R及铜耗I^2R自然就比较小，电机不仅效率较高，而且温升较低，性能当然有所改善。但线径太大以后，槽面积不一定放得下应有的匝数，下线工艺困难。考虑下线难易程度的是下面要研究的第二个问题——槽满率或填充系数。分别讨论如下。

一、发热因子

在没有具体讨论发热因子以前，我们先介绍两个名词。

1. 电流密度

导体每单位面积上所通过的电流，就是电流密度，通常用符号J来表示。小容量串激电动机都是两极的，两极电机的转子绕组是两路并联。如果令I表示流入转子绕组的总电流，则每条支路的电流应是$\frac{I}{2}$。再令S_a表示转子导体截面积，则转子绕组的电流密度应为

$$J=\frac{I}{2S_a} \qquad 4-27$$

式中：J——转子绕组电流密度，安/毫米^2；

I——转子绕组电流，安；

S_a——转子导体截面积，毫米^2。

一般串激电动机绕组电流密度大致为：连续运行电机 J = 8—10安/毫米^2。短时运行电机 J = 10—13 安/毫米^2。一般情况下，小容量电机 J 值取得偏大，而大容量电机J 值取得偏小。电流密度取得高，导线就比较细，可以省铜，但电阻 R 增大，电阻损耗 I^2R 大，电机效率降低，温升提高。

2.线负荷 A

线负荷也称电负荷，它的定义是：转子外圆单位圆周长度上的电流，通常用A来表示。设 N 是转子绕组的总导体数，i 是每根导体中的电流，因此 Ni 是转子圆周上的总电流。πD 是转子周长。因此转子外圆单位圆周长度上的电流，即线负荷为

$$A=\frac{Ni}{\pi D} \qquad 4-28$$

式中：A——线负荷，安/厘米；

N——转子绕组总导体数；

i——转子导体电流，安；

D——转子外径，厘米。

任何一个电机电磁负荷的高低，对它性能影响很大。所谓磁负荷就是指磁通密度 B，所谓电负荷就是指电流密度 J 与线负荷 A。这三个参数中尤其是磁通密度 B 和线负荷A，对电机的性能、价格、重量影响很大（分析略）。下面我们

只讨论电流密度 J 与线负荷 A 对电机发热的影响。

不论是定子绕组还是转子绕组，通过电流之后都要产生损耗，使绕组发热温度升高。因此，定、转子绕组的发热问题都应该进行研究。但一般情况下，为简单计，总是用转子绕组的发热情况来估计整个电机的温升。转子绕组又分为两部分，一部分是绕组的端部，它直接暴露在空气中，散热情况好些，另一部分是电枢槽内部分，它包以绝缘之后，埋在槽中，散热情况坏些。只要槽内这一部分绕组发热问题通过了，一般情况下，电机的温升不致于太高。槽内这一部分绕组的发热问题是用下面方法考虑的。

我们假定：槽内部分绕组铜耗产生的热量是由转子铁心外表面散出去的，那么由电枢单位面积上散发出去的热量是

$$q = \frac{\text{槽内部分绕组铜耗}}{\text{转子铁心外表面积}} \qquad 4-29$$

如果令 l—转子铁心长度，S_a—转子导体截面积，则槽内部分转子绕组一根导体的电阻为$r = \rho\frac{l}{S_a}$，ρ为电阻系数。令 i—一条支路中的电流，则一根导体的损耗为 $i^2r = i^2\rho\frac{l}{S_a}$。

令 N—转子绕组总导体数，则

$$\text{转子绕组槽内部分的损耗} = Ni^2\rho\frac{l}{S_a} \qquad 4-30$$

令 D表示转子外径，则

$$\text{转子铁心外表面积} = \pi D l \qquad 4-31$$

将式 4—30及式 4—31代入式 4—29中，可得

$$q = \frac{Ni^2 \rho \frac{l}{S_a}}{\pi D l}$$

或

$$q = \rho \frac{Ni}{\pi D} \frac{i}{S_a} = \rho AJ \qquad 4-32$$

式中：q——转子外圆单位面积上散出的热量；

$\frac{Ni}{\pi D} = A$——线负荷（式4—28）；

$\frac{i}{S_a} = J$——转子绕组电流密度；

ρ——电阻系数。

式4—32告诉我们：需要由电枢单位面积上散发出去的热量q，正比于线负荷A与电流密度J的乘积。AJ乘积越大，需要由电枢单位面积上散出去的热量越多，电机的温升当然将越高。由于AJ的乘积决定了电机的发热情况，所以称它为发热因子。

一般电枢绕组的最热点在槽部，所以电枢绕组的温升基本上由q值决定，亦即由发热因子AJ值来决定，这一点已由生产实践所证实。当然，电枢铁心的铁损耗也会影响绕组温升，但影响的程度不如AJ显著，所以应当把AJ值保持在一定范围内。如果A的单位用安/厘米，J的单位用安/毫米^2，经过生产实践的检验，发热因子的数值在1400—1800范围内选取，电机的温升不致于太高。

当所用绝缘材料的等级提高（如E级改F级），绝缘厚度减薄，或通风结构改善，发热因子AJ均可取得比上述值高一些。

分析到这里，可以看出，决定绕组线径的是电流密度，而电流密度的选取不是孤立的，它要同线负荷一起来考虑，使发热因子不超过上述范围。一般来讲，转子外径越大，槽就越深，槽内可以放更多的导体，转子总导体N就大，线负荷A值也就大了（式4—28）。为了保证发热因子不超过上述的数值范围，电流密度J值取得较低。附表—2中所列的A、J值，就证实了上述的规律。

二、槽满率或填充系数

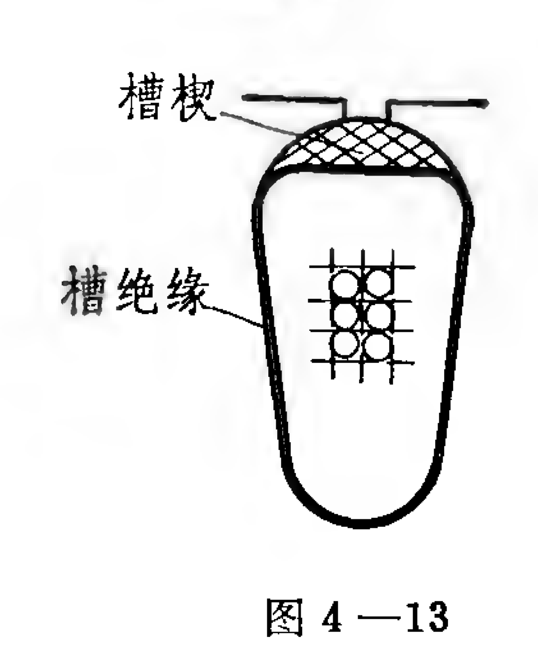


图4—13

如果线径取得较大，电流密度自然就小，不仅发热因子AJ值小，而且电机的效率也可以提高，从性能上讲是有利的。但线径太大，槽面积不一定放得下应有的匝数，下线工艺困难。在生产实践中，说明下线难易程度的是槽满率Sf它的数学表示式为

$$Sf=\frac{\text{导线在槽内作有规律排列时实际占有的面积}}{\text{槽的有效面积}}$$

或

$$Sf=\frac{N_Z d^2}{S_e} \qquad 4-33$$

式中：S_e—槽的有效面积，即扣除槽绝缘及槽楔所占的空间后，所剩下来用以放置绕组的那一部分槽面积。（见图4—13）。

N_Z—每槽导线数。

d^2—d是绝缘后的导线直径。从图4—13可以看出，当导线作有规律排列时，圆形导线实际所占有的

空间面积，与方形导体一样，所以用d^2来表示导线实际占有的空间面积。

采用较大的槽满率，槽的空间面积利用较好，但下线工艺困难，影响劳动生产率。如果采用较小的槽满率，虽然下线工艺改善，但槽的空间面积未充分利用，而且导体在槽内比较松散，运转时，易使导体绝缘磨损，造成短路。因此采用多大的槽满率较合适，视各工厂具体情况而定。下线工艺比较熟练时，可采用较高的槽满率，以提高铁心的利用程度。根据目前的生产情况，槽满率以（70～75%）左右较合适。

在利用式4—33计算槽满率时，必须算出槽的有效面积S_e，而S_e的计算略为麻烦，在修理电机时，为了简化计算过程，往往用填充系数来代替槽满率。填充系数K_Z的数学表示式为

$$K_Z = \frac{导线的总面积S}{槽的总面积F} \qquad 4—34$$

在采用漆包圆铜线的情况下，填充系数在下列数字范围内选取，$K_Z = 0.32 \sim 0.36$。

三、转子绕组线径的决定

上面从工艺、发热、性能上讨论了影响线径大小的各因素，这一小段我们就介绍在修理电机时决定线径的三种具体方法。

1.从额定电流来求导线的截面积

如果电机名牌尚未遗失，名牌上往往标有电机的额定电流，此时可以根据额定电流来求导线的截面积S_a。从式4—27我们知道

$$S_a = \frac{I_N}{2J}(\text{毫米}^2) \qquad 4-35$$

式中：I_N—电机的额定电流，安；

J—电流密度，安/毫米^2。

如前所述，电流密度的高低，就决定了线径的粗细，也就决定了电阻R及电阻损耗I^2R的大小。I^2R是电机中一项主要的损耗，约占总损耗的50%左右，对电机的温升及效率影响很大。因此电流密度J最好参照附表—1、附表—2、附表—3及附表—10中尺寸、转速相近的同类型电机选取，比较容易保证性能。导线截面积S_a决定后，由附表—5即可查得导线的规格。

2.从原有绕组的线径来求重绕后绕组的线径

如果对某电机要进行改变电压或改变转速的重绕计算，则重绕以后的额定电流已非名牌上的数值，用上述方法决定线径已不可能，此时可用下面的方法来决定重绕后的线径。

我们知道槽满率是说明下线难易程度及铁心是否充分利用的重要指标。如果希望在重绕前后，下线难易程度及铁心利用情况不变，就是希望槽满率不变。从式4—33我们知道，希望槽满率不变，就是希望在重绕前后N_Zd^2的乘积不变。如果令N_Z'、d'是重绕前的每槽导线数及线径，N_Z、d是重绕后每槽导线数及线径，则应该

$$N_Zd^2 = N_Z'd'^2$$

即

$$d = \sqrt{\frac{N_Z'}{N_Z}}d' \qquad 4-36$$

根据d，查阅附表—5，即可求得绕组的线规了。

3.从槽面积求绕组的线径

对于一个绕组数据已全部遗失的无名牌电机，既不知道它的额定电流，也不知道重绕前转子绕组的每槽导线数及线径，此时就必须从槽面积来推算绕组线径。具体方法如下。

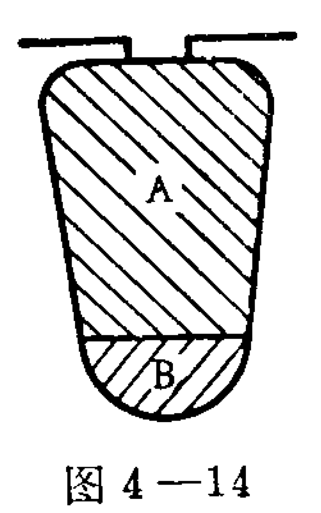


图 4—14

（1）测量出转子槽形尺寸，算出槽的面积 F = 面积 A + 面积 B（毫米^2），如图 4—14所示。

（2）求出槽内导线的总面积 S（式 4—34）

$$S = F \cdot K_Z \qquad 4-37$$

式中：S——槽内导线的总截面积，毫米^2；

F——槽的截面积，毫米^2；

K_Z——填充系数，$K_Z = 0.32 \sim 0.36$。

（3）求出每根导线截面积

$$S_a = \frac{S}{N_Z} \text{（毫米}^2\text{）} \qquad 4-38$$

式中：N_Z—每槽导线数，由式 4—26 求取。导线截面积S_a初步确定后，由附表—5 就可查得导线的规格。

（4）求出额定电流（式 4—27）

$$I_N = 2S_aJ \qquad 4-39$$

电流密度 J 可参照附表—1、附表—2、附表—3 及附表—10中尺寸、转速相近的同类型电机选取。

（5）估算电机的输入功率（式 4—19）

$$P_1 = UI_N\cos\varphi \text{ 瓦} \qquad 4-40$$

式中：U—电源电压，伏；

I_N—额定电流，安，由式 4—39求得；

$\cos\varphi$—功率因数，可由附表—1、附表—2、附表—3及附表—9中尺寸、转速相近的同类型电机查得。

4—7 交流串激电动机定子绕组匝数及线径估算

同转子绕组一样，在进行定子绕组重绕计算时。主要也是决定定子绕组的匝数和线径。

首先我们看定子绕组匝数的估算方法，在串激电动机中有两个绕组，一个是定子绕组，一个是转子绕组，这两个绕组的匝数并不是一成不变的。设计时，可以让定子匝数多些，转子匝数少些；也可以反过来，让定子匝数少些，转子匝数多些。两种情况下，仍然能使电机的一些主要性能一样。例如，在保证同一转速的情况下，可以设计得定子匝数多些，转子匝数少些；也可以设计得定子匝数少些，转子匝数多些。这个道理我们可以通过式4—9来解释。式4—9告诉我们，转子上的总导体数为

$$N = 84.84 \times 10^{8} \frac{E}{\phi_m n} \qquad 4—41$$

式中，转子绕组的旋转电势 $E = K_e U$，在电源电压U一定的情况下，它是一个变化范围不大的数值。在保证转速不变的情况下，n也为定值。因此式4—41告诉我们，在电源电压U（也就是E）及转子转速n一定的情况下，转子上的总导体数N是反比于定子磁通 ϕ_m 的。因此，如果定子匝数取得多些，定子磁势就大，定子磁通 ϕ_m 就多，当然转子上的总导体数N就少，转子匝数也就少了。反过来，如果定子匝数取得少些，定子磁势就少，定子磁通 ϕ_m 也少，当然转子上

的总导体数N就多，转子匝数也就多了。因此，定、转子绕组的匝数是可以互相转移的。在设计或修理电机时，如果转子空间位置比较紧张，放不下所有的导体，可以将定子匝数取得多些，转子匝数就少了。反过来，如果感到定子空间位置紧张，可以将转子匝数取得多些，定子匝数也就少了。这是生产实践中经常采用的方法。这里必须指出，这种定、转子绕组匝数的互相转移，只能保证某些主要的性能不变，并不是所有的性能都一样。那么这种定、转子绕组匝数互相转移的结果，会对那些性能产生影响呢？下面进行分析。我们假定定子匝数取得多，转子匝数取得少，此时性能会有下列变化：

1.换向过程可能改善，电机火花较小。有关这方面的道理我们在5—2节中再进行解释。

2.可以提高机械特性的硬度，使电机的空载转速不致于太高。在3—4节分析串激电动机特性时，我们曾经提到，串激电动机的机械特性较软，也就是说，负载转矩增大的时候，转速急剧的下降。这有它好的一面，使得在负载转矩大幅度变化时，电机功率变化不大，电机不容易因过载而烧坏。但也有它坏的一面，空载转速往往过高，容易造成电机因离心力过大而损坏。尤其是电动工具，负载往往是断续的，电动机经常要处于空载状态之下，空载转速过高是我们所不希望的。此时就要适当提高机械特性的硬度，以降低空载转速的数值（图4—15）。从图4—15可以看出，如果在满载M_N时，具有相同的转速n_N，那在空载M_0时，机械特性较软，空载转速n_0就较高，机械特性较硬，空载转速n_0'就较低。而提高机械特性硬度的措施之一，就是选取较多的定

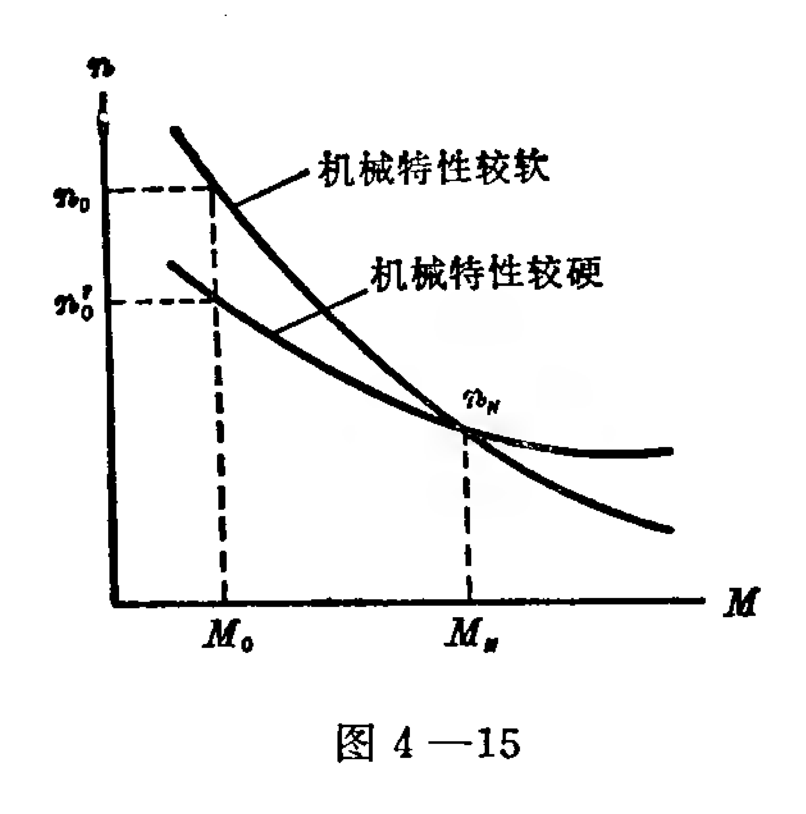


图 4 —15

子匝数。这是因为定子匝数多，定子磁势就大，定子产生的磁通ϕ_m也就大，电机比较饱和，在 3 — 4 节中我们就已经分析过，电机饱和以后，可提高机械特性的硬度。

3.定子匝数增多，定子绕组电抗 x 就增大，电机的功率因数可能降低，有关这方面的道理，已在 3 — 3 中进行过分析。

4.定子匝数取得多以后，产生的磁通ϕ_m就大，根据电工知识我们知道，铁心损耗近似地正比于磁通密度 B 的平方，也就是正比于磁通 ϕ_m 的平方，因此磁通 ϕ_m 的增大，会使电机的铁耗上升，这会降低电机的效率。

在设计电机时，定子匝数必须进行详细计算，以保证所有性能都能满足要求。在修理电机时，为了方便易行，定子绕组匝数可用下面方法进行估算。

令 N 表示转子绕组总导体数，由于每两根导体组成一匝，因此转子绕组总匝数为$\frac{N}{2}$。W_1 表示定子每极匝数，定子两个磁极的总匝数便为$2W_1$。再令 C表示定、转子绕组匝数比，则

$$C = \frac{2W_1}{\frac{N}{2}} = 4\frac{W_1}{N} \qquad 4—42$$

各种类型串激电动机定、转子绕组匝数比 C，可根据附表—1、附表—2、附表—3及附表—6、附表—8及附表—10中尺寸、转速相近的同类型电机选取。只要从这些附表中查出C值，即可利用式4—42计算出定子绕组每极匝数 W_1，即

$$W_1 = \frac{1}{4}CN \qquad 4—43$$

下面我们再看定子绕组线径的决定方法。根据图4—7我们知道，两极电机的转子绕组是两路并联的，转子上的两条并联支路与定子绕组串联起来，流过的是同一电流。因此，定子绕组的导体截面积，应是转子绕组导体截面积的一倍。利用式4—35、式—36或式4—38求出转子绕组导体截面积 S_a 以后，定子绕组导体截面积 S_c 便为 $2S_a$，即

$$S_c = 2S_a \qquad 4—44$$

根据定子导体截面积 S_c，利用附表—5，即可查得定子绕组的导体线规。

在4—5、4—6及4—7节中，我们介绍了交流串激电动机定、转子绕组匝数及线径的估算方法。但是，必须着重指出，由于电机新旧程度的不同，空气隙大小的不同，以及所用导磁材料优劣的不同等原因，可能在某种情况下，按上述步骤计算，不能得到满意的结果，出现转速过低或转速过高的现象，这时可适当增减定子或转子绕组匝数来进行调整。

转速与匝数之间的近似关系为：

$$W' = W\frac{n}{n'} \qquad 4—45$$

式中：W'——调整后应绕匝数；

W——原绕匝数；

n′——拟调整转速；

n——原转速。

4—8 交流串激电动机定、转子绕组估算实例

一、例题

在4—5、4—6、4—7节中，我们分析了影响定、转子绕组匝数及线径的一些因素，并给出了有关的计算公式，这些公式是否准确呢？下面我们举个实例进行说明。这个实例是附表—3中的第一个电机，它的有关数据如下：

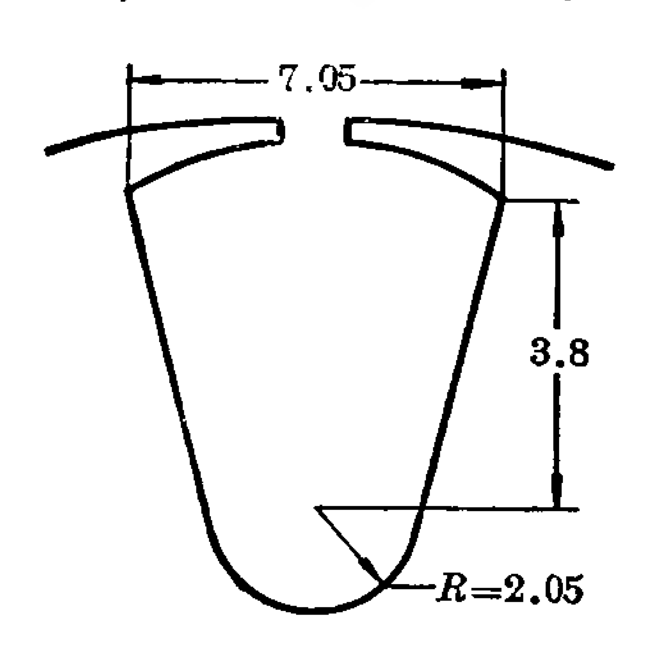


图4—16 单位：毫米

定子内径 D＝3.1厘米

铁心长度 l＝3.8厘米

转子槽数 Z＝9

换向器片数 K＝27

定子极弧宽度 b＝3.21厘米

转子槽形尺寸 见图4—16

电压 U＝220伏

功率因数 $\cos\varphi=0.965$

效率 $\eta=0.6$

转速 n＝14000转/分

试计算定、转子绕组各项数据。

要利用式4—9求转子绕组总导体数N，首先必须分别

求出旋转电势E、定子每极磁通ϕ_m及转子转速 n。具体步骤如下。

1. 旋转电势E。式4—21告诉我们

$$E=\frac{1+\eta}{2}U\cos\phi$$

$$=\frac{1+0.6}{2}0.965\times220=170\text{伏}$$

2. 定子每极磁通ϕ_m。式2—6告诉我们

$$\phi_m=B_\delta bl$$

定子每极磁通ϕ_m计算得是否符合实际情况，关键是磁通密度B_δ取多少。而B_δ的选取带有很大的经验成分，在缺乏经验的情况下，可参照附表中尺寸相近的同类型电机选取。查附表—3，空气隙磁通密度$B_\delta=4320$高斯。题目告诉我们极弧宽度$b=3.21$厘米，铁心长度$l=3.8$厘米。代入上式得

$$\phi_m=4320\times3.21\times3.8=5.26\times10^4\text{马}$$

3. 电机额定转速n。题目告诉我们转子转速为

$$n=14000\text{转/分}$$

4. 转子绕组总导体数N。由式4—9可知

$$N=84.84\times10^8\frac{E}{n\phi_m}$$

$$=84.84\times10^8\frac{170}{14000\times5.26\times10^4}$$

$$=1950\text{根}$$

5. 每个元件匝数W_y。由于换向器片数K等于元件数S，所以这个电机的元件数为

$$S=K=27\text{个元件}$$

由式 4 —25可知，每个元件的匝数

$$W_y = \frac{N}{2K}$$

$$= \frac{1950}{2 \times 27} = 36.15匝$$

匝数应当是一个整数，因此取$W_y = 36$匝。由式 4 —25 可知，这个电机转子的总导体数应是

$$N = 2KW_y$$

$$= 2 \times 27 \times 36 = 1944根$$

6.每槽导体数N_z。由式 4 —26可知

$$N_z = \frac{N}{Z}$$

$$= \frac{1944}{9} = 216根$$

7.槽面积 F。根据图 4 —14及图 4 —16可知，槽面积 F 等于梯形面积A加上半圆面积B。

$$梯形面积\ A = \frac{1}{2}（上底 + 下底）\times 高$$

$$= \frac{1}{2}(7.05 + 2 \times 2.05) \times 3.8 = 21.2毫米^2$$

$$半圆面积\ B = \frac{1}{2}\pi R^2$$

$$= \frac{1}{2}3.14 \times 2.05^2 = 6.6毫米^2$$

$$槽的总面积\ F = A + B$$

$$= 21.2 + 6.6 = 27.8毫米^2$$

8.导体所占面积S。由式4—37可知

$$S=K_zF$$

$$=0.33\times27.8=9.17\text{毫米}^2$$

9.每根导体的面积S_a。由式4—38可知

$$S_a=\frac{S}{N_z}$$

$$=\frac{9.17}{216}=0.0425\text{毫米}^2$$

查附表一5，应该选用的导线为$\phi0.23$，面积为$S_a=0.0415$毫米^2。

10.额定电流I_N估计。由式4—39可知

$$I_N=2JS_a$$

电流密度J对电机性能的影响有两个方面：其一是温升，其二是效率。它的选取也带有很大的经验成分。在缺乏经验的情况下可按照附表中尺寸相近的同类型电机选取，查附表一3得$J=13.25$安/毫米^2，代入上式得

$$I_N=2\times13.25\times0.0415=1.1\text{安}$$

11.输入功率P_1。由式4—40可知

$$P_1=UI_N\cos\phi$$

$$=220\times1.1\times0.965=233\text{瓦}$$

12.输出功率P_2。由式4—15可知

$$P_2=\eta P_1$$

$$=0.6\times233=140\text{瓦}$$

13.定子每极匝数W_1。由式4—43可知

$$W_1=\frac{1}{4}CN$$

定子每极匝数选取是否合适，关键在于定、转子绕组匝数比C的选取是否合适。同样C值的选取也需要经验。好在C值的变动范围比较狭窄。除个别电机外，新系列电动工具用交直两用串激电机的匝数比约在C＝0.5～0.56之间变化。参照附表一3，选取C＝0.507，代入上式得

$$W_1=\frac{1}{4}CN$$

$$=\frac{1}{4}0.507\times1944=246\text{匝/每极}$$

14.定子导体截面积S_c。由式4—44可知

$$S_c=2S_a$$

$$=2\times0.0415=0.083\text{毫米}^2$$

查附表一5，应该选用的定子导线为ϕ0.33。

上面这个例题主要说明了两个问题：其一是告诉我们在修理串激电动机时，计算定、转子匝数、线径的具体步骤。不论是电机改变转速的重绕计算，或者是无名牌电机的定、转子绕组计算，基本上都可参照上述步骤进行。其二是说明这个方法的准确性，按照上述计算方法所得到的结果，如定、转子绕组的匝数、线径等，均与附表——3中第一个电机的实际数据相符，因此这个方法是可靠的。当然这个方法也有它的缺点，例如气隙磁通密度B_δ及电流密度J，有一定变化范围，究竟选取多大较合适，带有很大的经验成分。如果功率因数cosϕ及效率η无法查到，要正确估算它们的数值也不容易。因此在修理电机时，最好将原来的绕组数据详尽地记录下来，照原样修复。在上面这个例题的基础上，下面我们介绍三种类型的定、转子绕组重绕计算，即：（1）无名牌电

机，原绕组数据遗失。（2）改变电机电压。（3）改变电机转速。

二、无名牌电机定、转子绕组重绕计算

例题：今有一单相电钻，实测数据如下：

转子外径	$D=4.40$厘米
转子铁心长	$l=4.6$厘米
转子槽数	$Z=12$
转子槽面积	$F=35$毫米^2
换向器片数	$K=36$
定子极弧长	$b=4.6$厘米。

试计算定、转子绕组各项数据。

这是一个无名牌电机，它的定、转子绕组各项数据的计算方法，基本上可以按照上面例题的计算步骤进行。在未进行具体计算以前，先要定出这个电机的效率、功率因数、磁通密度及电流密度等数据，具体方法如下：由于这是个无名牌电机，电机比较陈旧，因此可以判断它是属于老系列电钻范围的产品，它的一些数据可以参考附表一1来选取。再根据转子外径$D=4.40$厘米，转子铁心长度$l=4.6$厘米，可以判断出这个电钻的一些数据应与J1Z—13这个电钻的数据接近。因此从附表一1，查得有关的数据如下：

压降系数	$K_e=0.735$
功率因数	$\cos\phi=0.95$
气隙磁通密度	$B_\delta=4600$高斯
转子绕组电流密度	$J=9.65$安/毫米^2
定、转子绕组匝数比	$C=0.586$
转速	$n=10000$转/分

1. 旋转电势E。由式4—22知

$$E = K_e U$$
$$= 0.735 \times 220 = 162\text{伏}$$

2. 定子每极磁通ϕ_m。由式2—6知

$$\phi_m = B_\delta bl$$
$$= 4600 \times 4.6 \times 4.6 = 9.73 \times 10^4\text{马}$$

3. 转子转速n。

$$n = 10000\text{转/分}$$

4. 转子绕组总导体数N。由式4—9知

$$N = 84.84 \times 10^8 \frac{E}{\phi_m n}$$
$$= 84.84 \times 10^8 \frac{162}{9.73 \times 10^4 \times 10^4} = 1412\text{根}$$

5. 转子每个元件匝数W_y。由式4—25知

$$W_y = \frac{N}{2K}$$
$$= \frac{1412}{2 \times 36} = 19.6\text{匝}$$

取$W_y = 20$匝。由式4—25知

$$N = 2KW_y$$
$$= 2 \times 36 \times 20 = 1440\text{根}$$

6. 每槽导线数N_z。由式4—26知

$$N_z = \frac{N}{Z}$$
$$= \frac{1440}{12} = 120\text{根}$$

7.导线所占的面积S。由式4—37知

$$S = K_z F$$

$$= 0.34 \times 35 = 11.9\text{毫米}^2$$

8.每根导体的面积S_a。由式4—38知

$$S_a = \frac{S}{N_z}$$

$$= \frac{11.9}{120} = 0.099\text{毫米}^2$$

查附表—5，应该选用的导线为φ0.35，导线的面积$S_a = 0.0962\text{毫米}^2$。

9.额定电流I_N估算。由式4—39知

$$I_N = 2JS_a$$

$$= 2 \times 9.65 \times 0.0962 = 1.86\text{安}$$

10.输入功率P_1。由式4—40知

$$P_1 = UI_N\cos\varphi$$

$$= 220 \times 1.86 \times 0.95 = 388\text{瓦}$$

11.定子每极匝数W_1。由式4—43知

$$W_1 = \frac{1}{4}CN$$

$$= \frac{1}{4}0.586 \times 1440 = 211\text{匝/每极}$$

12.定子导线截面积S_c。由式4—44知

$$S_c = 2S_a$$

$$= 2 \times 0.0962 = 0.192\text{毫米}^2$$

查附表—5，定子绕组应该选用的导线为φ0.49。

三、改变转速时的重绕计算

串激电动机的许多性能都与转速有关，其中以功率及功率因数与转速的关系最为密切。从2—3节的分析我们知道，电机的功率近似的与转速成正比关系。在铁心尺寸一定的情况下，转速提高一倍，电机的功率也近似地增加一倍。从3—3节的分析我们又知道，电机的功率因数也随转速的提高而提高。高速电机的功率因数总是大于低速电机的功率因数。当转速改变时，定、转子绕组的匝数如何变化呢？下面我们通过一个实例进行说明。这个实例就是附表—8中的G80/40。它的具体数据如下

输出功率	$P=80$瓦
转　　速	$n=4000$转/分
定子铁心外径	$D_1=7.13$厘米
定子铁心内径	$D_2=3.93$厘米
极弧宽度	$b=4.15$厘米
铁心长度	$l=4.4$厘米
槽　　数	$Z=11$
换向片数	$K=33$片
每槽导体数	$N_z=276$根
转子线规	$\phi0.23$

今须将此电机的转速改为$n=12000$转/分。试估算改变转速以后电机的功率及定、转子绕组的匝数和线径。

原来转速是4000转/分，如果将电机转速提到12000转/分，转速提高了3倍。由于功率近似地正比于转速，电机的功率也将提高3倍。原来功率是80瓦，转速提高到12000转/分后，电机的功率将为$80\times3=240$瓦左右。根据功率$P=240$

瓦，定子外径$D_1=7.13$厘米，定子内径$D_2=3.93$厘米，铁心长度$l=4.4$厘米，我们可以知道，这个电机提高转速以后，它的有关数据与附表—2中DT52这个电机接近。查阅附表—2中DT52这个电机，得到下列有关数据：

效　　率	$\eta=0.627$
功率因数	$\cos\varphi=0.93$
气隙磁通密度	$B_\delta=4860$高斯
定、转子匝数比	$C=0.482$

有了η、$\cos\varphi$、B_δ及C这四个数据后，即可按照下列步骤进行改变转速的重绕计算了。

1. 旋转电势E。由式4—21知

$$E=\frac{1+\eta}{2}U\cos\varphi$$

$$=\frac{1+0.627}{2}\times0.93\times220=166.5\text{伏}$$

2. 定子每极磁通ϕ_m。由式2—6知

$$\phi_m=B_\delta bl$$

$$=4860\times4.15\times4.4=8.87\times10^4\text{马，}$$

3. 转子绕组总导体数N。由式4—9知

$$N=84.84\times10^8\frac{E}{\phi_m n}$$

$$=84.84\times10^8\frac{166.5}{8.87\times10^4\times1.2\times10^4}$$

$$=1325\text{根，}$$

4. 每个元件匝数W_y。由式4—25知

$$W_y=\frac{N}{2K}$$

$$=\frac{1325}{2\times 33}=20.08\text{匝},$$

W_y应取一整数，即取$W_y=20$匝，因此转子上的总导体数便为

$$N=2KW_y$$

$$=2\times 33\times 20=1320\text{根。}$$

5. 每槽导体数N_z。由式4—26知

$$N_z=\frac{N}{Z}$$

$$=\frac{1320}{11}=120\text{根。}$$

6. 转子绕组线径。如果在重绕前后，我们希望保持槽满率不变，就可以根据式4—36来决定绕组线径。重绕前每槽导线数为$N_z'=276$，转子绕组线径为$d'=0.23$，重绕后每槽导线数为$N_z=120$，此时的转子绕组线径如果为d，在保持槽满率不变的情况下，应有

$$d=\sqrt{\frac{N_z'}{N_z}}d'$$

$$=\sqrt{\frac{276}{120}}\times 0.23=0.348\text{。}$$

线径应取附录—5中的标准值，即重绕后转子线径应为$\phi 0.35$，截面积$S_a=0.0962$毫米^2。

7. 定子每极匝数W_1。由式4—43知

$$W_1=\frac{1}{4}CN$$

$$=\frac{1}{4}\times 0.482\times 1320=159\text{匝。}$$

8. 定子绕组导线截面积S_c。由式 4—44知

$$S_c = 2S_a$$

$$= 2 \times 0.0962 = 0.1924\text{毫米}^2$$

根据$S_c = 0.1924$毫米^2，查附表—5，知定子绕组线径应为φ0.49。

四、改变电压时的重绕计算

在改变转速的重绕计算时，我们曾经提到，电机的许多性能与转速有关。尤其是功率及功率因数与转速的关系更为密切。与改变转速的情况相反，当改变电压时，电机的一些主要性能，包括效率及功率因数等，却变化不大。这个现象可以通过附表—1来说明。在附表—1中，同样一个6毫米电钻（即J1Z—6），可以做成电压为U＝36伏，也可以是U＝110伏或U＝220伏，在三种情况下，它们的效率、功率因数或者相等，或者十分接近。

从附表—1我们又可以看出，定子每极匝数及转子每个元件匝数或每槽导体数，基本上是与电压成正比的，这就使得改变电压的重绕计算十分简单。当电压升高时，只要将定、转子绕组匝数相应的增多就行了。同样，当电压降低时，只要将定、转子绕组匝数相应的减少就行了。下面我们以一个具体的例子来说明改变电压重绕计算的具体步骤。

今有一型号为J1Z—6，工作电压U＝36伏的电钻，它的绕组数据是：

定子每极匝数	$W_1 = 42$匝
转子每元件匝数	$W_y = 7$ 匝
转子每槽导体数	$N_z = 42$根
转子线规	2—φ0.41

今需将此电钻改为电压U = 220 伏，试求改变电压以后的定、转子绕组各项数据。

1. 电压升高的倍数K_u。

$$K_u = \frac{220}{36} = 6.1\text{倍}$$

2. 定子绕组每极匝数W_1。电压升高6.1倍，定、转子绕组的匝数也增加6.1倍，因此

$$W_1 = 6.1 \times 42 = 256\text{匝}$$

3. 转子绕组每个元件匝数W_y。

$$W_y = 6.1 \times 7 = 42.7\text{匝}$$

取$W_y = 43$匝。

4. 转子绕组的线径。我们希望在重绕前后，保持槽满率不变，此时应该用式 4 —36来决定绕组的线径。由于电压升高了6.1倍，转子的匝数也升高了6.1倍，所以改变电压以后，每槽导线数也增加了6.1倍，即$N_z/N_z' = 6.1$或$N_z'/N_z = \frac{1}{6.1}$，代入式 4 —36得：

$$d = \sqrt{\frac{N_z'}{N_z}}d'$$

$$= \sqrt{\frac{1}{6.1}}0.41 = 0.166$$

根据d = 0.166，查阅附表— 5 ，知道应该选用的转子线规为φ0.16，截面积为$S_a = 0.0201$毫米^2。

原来转子绕组是两根导线并绕的，每根导线直径是0.41，电压改为U = 220伏以后，如果还是两根并绕，则每根导线直径应为0.16。但实际上φ0.16的导线是比较细的，不须要两

根并绕，可用一根较粗的导线来代替。两根 0.16 的导线并绕，总的面积为 $2\times0.0201=0.0402$ 毫米^2。根据 0.0402 毫米^2，查阅附表—5，可知这一根较粗导线的直径应为 $\phi0.33$。

5. 定子绕组的线径。根据式 4—44可知，定子绕组导体的截面积为

$$S_c=2S_a$$
$$=2\times0.0402=0.0804\text{毫米}^2$$

根据$S_c=0.0804$毫米^2。查阅附表—1，可知定子绕组线径应为$\phi0.33$。

如果我们把用上述方法计算出来的数据，同附表—1中J1Z—6型电钻在U=220伏的绕组数据相比，我们可以发现，各项数据是极为接近的。当然，如果把计算值同附表—1中的实际值相比，转子每个元件匝数偏多。这是由于两者转速不等所造成的。在这个例题中，改变电压时，假定转速未变，n=10000转/分。而J1Z—6型电钻在U=220伏的转速却为13500转/分（见附表-2）。从式4—45可以看出，匝数是反比于转速的，转速低的电机，定、转子匝数偏多。

上面我们研究了改变电压时重绕计算的具体步骤，下面我们介绍改变电压重绕计算时要注意的两个问题。

1. 当电机由低电压改绕成高电压时，必须核算换向器每两片之间电压的数值，如果片间电压太高，改绕成高压电机以后，运转时会产生火花。有关这方面的问题请详阅5—4节中“电位差火花”部分内容。

2. 当电机由高电压改绕成低电压时，转子元件匝数往往会出现小数。例如在附表—1中，J1Z—10型电钻，当电压

$U=24$伏时，转子元件匝数$W_y=4.5$匝；当电压$U=36$伏时，转子元件匝数$W_y=6.5$匝。转子元件匝数为什么会出现小数呢？这是因为

$$W_y=\frac{N}{2K}$$

N与K的数值，不一定正好使W_y得到一个整数，例如在4—8节的例题中：$W_y=\frac{N}{2K}=\frac{1950}{2\times27}=36.15$匝。当电机电压高时，每个元件匝数$W_y$多，小数点以后的数值所占比例甚小，完全可以舍去。例如计算值$W_y=36.15$匝，实际取$W_y=36$匝，误差不过0.417%，这不会对电机性能产生影响。但低压电机每个元件匝数甚少，小数点以后的数值所占比重较大，是不能随便舍去的。例如J1Z—10型电钻，当电压为$U=24$伏时，元件匝数$W_y=4.5$匝，如果取$W_y=4$匝，误差就达到12.5%，这会使电机性能产生很大变化。因此，由于低压电机中元件匝数甚少，小数点以后的数值所占比重较大，不能随便略去，因此，便使匝数出现了小数。下面我们以元件匝数$W_y=4.5$匝为例来说明这种绕组的构成方法。

就每个具体元件来讲，它的匝数都是整数，不可能存在小数，所谓元件匝数$W_y=4.5$匝，是指转子上元件匝数的平均值而言。就附表一1中J1Z—10型电钻来讲，当电压$U=24$伏时，共有24个元件，元件匝数的平均值$W_y=4.5$匝，因此这24个元件中，有12个元件是4匝，有12个元件是5匝，这样每个元件的平均匝数便是4.5匝了。为了使整个转子绕组对称，这两种不同匝数的元件互相间隔排列，因此，$U=$

24伏的 J1Z—10 型电钻，它的转子绕组展开图便如图 4 —17 所示，其中实线元件表示每个元件匝数为 4 匝，虚线元件表示每个元件匝数为 5 匝。

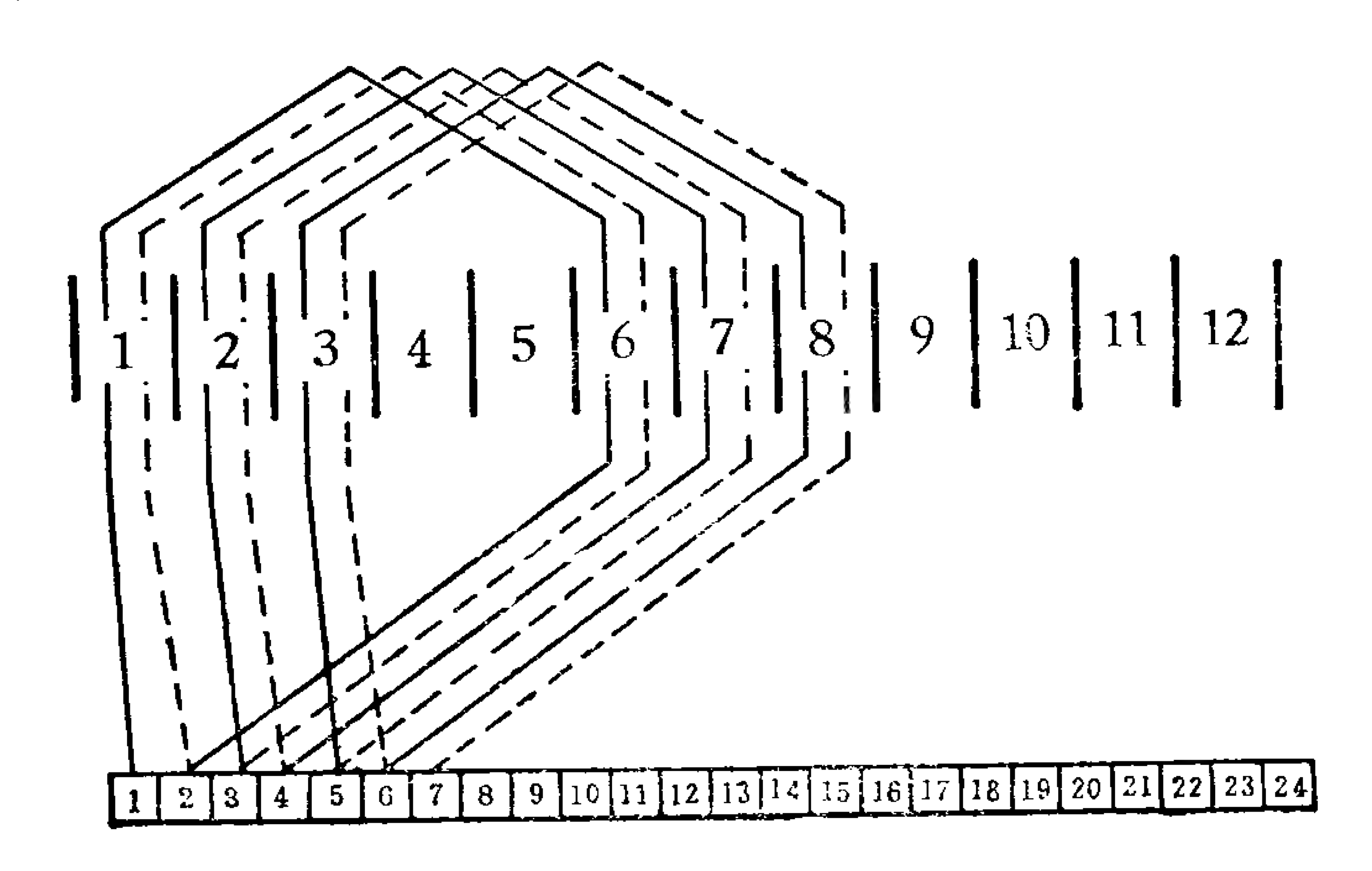


图 4 —17

第五章　串激电动机的换向过程

串激电动机的修理工艺并不复杂，但修理好之后遇到最大的困难，就是电刷下的火花问题不易解决。火花超过一定限度后，电刷与换向器烧坏而使电机不能正常工作。造成火花的原因主要是电机换向不良引起的，因此，换向与火花是串激电动机中一个十分重要的问题。在这一章，我们研究这个问题的方法是：首先通过直流串激电动机说明换向过程的本质，以及改善换向消除火花的方法。最后再来分析交流串激电动机换向过程的特点。

5—1　换向与火花

在直流电机中，换向过程可以从图5—1得到说明。图中表示的是一个简化了的直流电机转子绕组，旋转方向从右向左，如箭头所示。在图5—1(a)中，电刷左边有一条支路，电刷右边也有一条支路。假定在某一瞬间电刷与换向器片1接触，则两条支路的电流均由换向器片1流到电刷。此时，在粗线所表示的元件中，电流方向是从右向左流动〔图5—1(a)〕。经过T时间后，电刷与换向器片1分开，而完全与换向器片2接触〔图5—1(c)〕，两条支路的电流将均由换向器片2流到电刷。此时在粗线所表示的元件中，电流方向改变，为自左向右流动。这个元件中电流改变方向的过程，就称为换向。换向过程所需的时间T，称为换向周期。

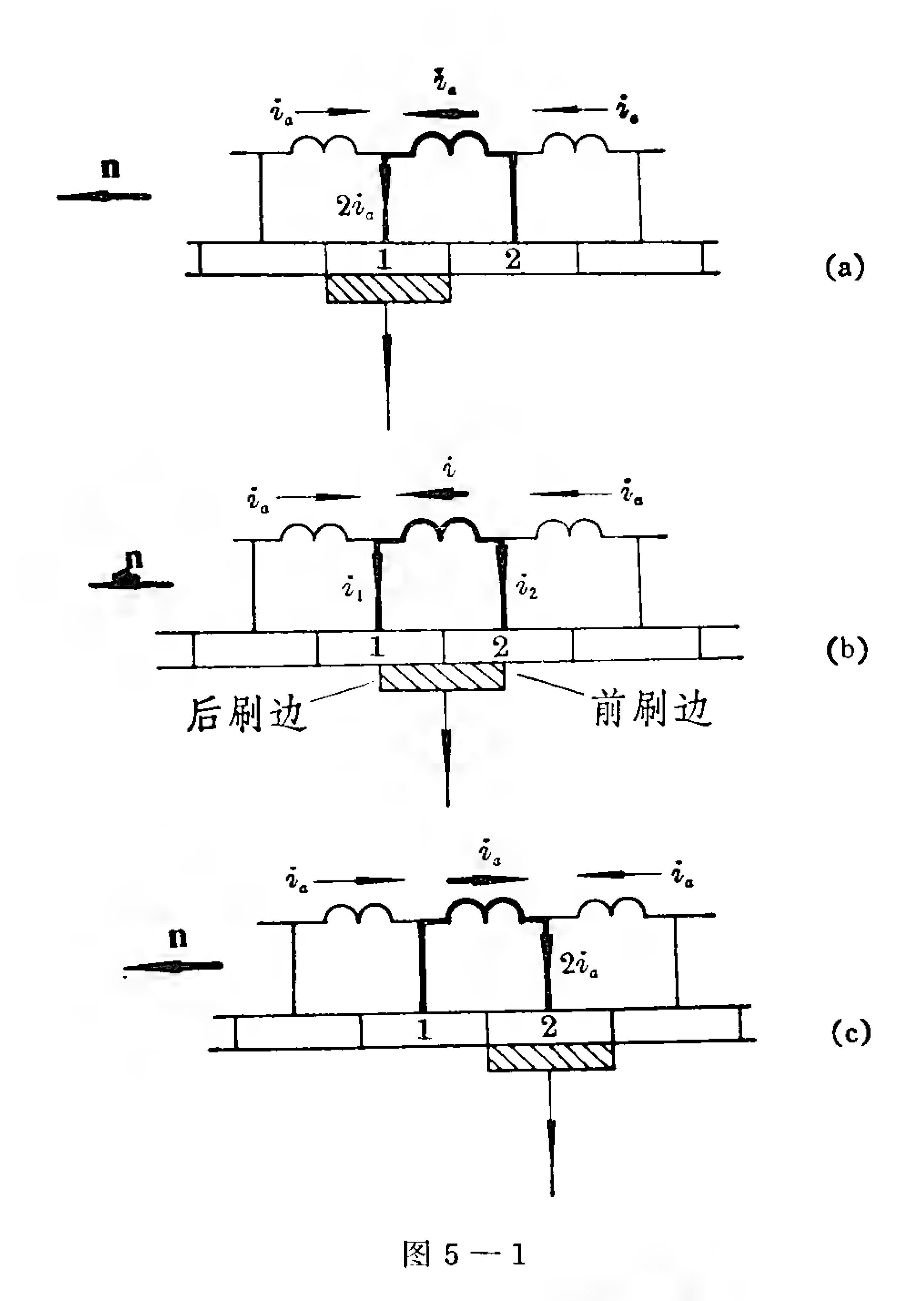


图 5—1

转速越高，换向周期越短。由于小容量串激电动机往往设计成高转速的，因此它的换向周期远比一般的直流电机短得多，约为 T＝0.0001～0.0002 秒。换向周期非常短促，在这样短暂时间内，要使元件中的电流改变方向是很不容易的。

换向困难的直接后果是在电刷下面出现火花，当火花超

过一定限度后，将使电机损坏而不能工作。因此，任何一种换向器式电机，换向过程都是一个很重要的问题。由于小容量串激电动机往往设计成高转速的，换向周期特别短促，换向与火花的问题就更突出。为了说明火花的程度，我国电机基本标准规定了下面五种火花等级（表5—1）。一般串激

表5—1

火花等级	电刷下的火花程度	换向器及电刷的状态
1	无火花	
$1\frac{1}{4}$	电刷边缘仅小部分有微弱的点状火花，或有非放电性的红色小火花	换向器上没有黑痕及电刷上没有灼痕
$1\frac{1}{2}$	电刷边缘大部分或全部有轻微的火花	换向器上有黑痕出现，但不发展，用汽油擦其表面即能除去，同时在电刷上有轻微灼痕
2	电刷边缘全部或大部分有较强烈的火花	换向器上有黑痕出现，用汽油不能擦除，同时电刷上有灼痕。如短时出现这一级火花，换向器上不出现灼痕，电刷不被烧焦或损坏
3	电刷的整个边缘有强烈的火花，同时有大火花飞出	换向器上的黑痕相当严重，用汽油不能擦除，同时电刷上有灼痕。如在这一级火花等级下短时运行，则换向器上将出现灼痕，同时电刷将被烧焦或损坏

电动机的火花不应超过2级。

5—2 直线换向、延迟换向与提前换向

从对图5—1的分析可以看出，在图5—1(a)这一瞬间，电刷与换向器片1接触，换向元件中的电流自右向左流动，这是换向即将开始时的情况。在图5—1(c)这一瞬间，电刷与换向器片1分离，而全部与换向器片2接触，换向元件中的电流改变方向，是自左向右流动，这是换向结束时的情况。至于在换向进行期间，换向元件中的电流如何变化，一般有三种情况，即：(1)直线换向，(2)延迟换向，(3)提前换向。下面我们分别研究三种情况下，换向元件中电流i的变化规律。

一、直线换向

图5—1(b)是元件正在进行换向的情况，此时，换向元件正好为电刷所短路。从图5—1(b)可以看出，在换向过程中，转子电流一部分从换向器片1流到电刷，用i_1来表示。一部分电流从换向器片2流到电刷，用i_2来表示。这两部分电流的大小，由这两条支路的电阻来决定。实践经验告诉我们，电刷与换向器之间的接触电阻在这里起着决定性的作用，如果令

r_1——换向器片1与电刷的接触电阻

r_2——换向器片2与电刷的接触电阻

电阻越大，电流越小，也就是说，电流与电阻成反比例，所以

$$\frac{i_1}{i_2}=\frac{r_2}{r_1} \qquad 5-1$$

换向器片与电刷间的接触电阻是由它们之间的接触面积来决定的，如果令

S_1——换向器片1与电刷的接触面积

S_2——换向器片2与电刷的接触面积

接触面积越大，电流越容易流过，接触电阻便越小。也就是说，接触电阻与接触面积成反比例，所以

$$\frac{r_2}{r_1}=\frac{S_1}{S_2} \qquad 5-2$$

将式5—2代入式5—1，得

$$\frac{i_1}{i_2}=\frac{S_1}{S_2} \qquad 5-3$$

下面我们再看S_1与S_2的变化规律。由于电机在旋转，这两个面积都随时间而变化。对换向器片2与电刷的接触面积S_2而言，它是随时间成正比变化的。如果v——换向器的周边线速度，t——换向开始后所经过的时间，则

$$S_2 \xrightarrow{\text{正比于}} vt \qquad 5-4$$

当$t=T$，即换向结束时，电刷全部与换向器片2相接触，而与换向器片1分离。如果令S——电刷总的接触面积，则当$t=T$时，$S_2=S$，也就是

$$S \xrightarrow{\text{正比于}} vT \qquad 5-5$$

从总的接触面积S中，减去S_2，便是S_1，即

$$S_1=S-S_2 \qquad 5-6$$

将式5—4及式5—5代入式5—6，得

$$S_1 \xrightarrow{\text{正比于}} vT - vt \qquad 5-7$$

将式5—4及式5—7代入式5—3，得

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{vT - vt}{vt} = \frac{T - t}{t} \qquad 5-8$$

此外，由图5—1(b)可以看出

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= i_a + i \\ i_2 &= i_a - i \end{aligned}\right\} \qquad 5-9$$

式中：i_a——电枢绕组支路电流；

i——换向元件中的电流。

将式5—9代入式5—8，得

$$\frac{i_a + i}{i_a - i} = \frac{T - t}{t}$$

或写成

$$\frac{i_a + i}{T - t} = \frac{i_a - i}{t} \qquad 5-10$$

根据数学中的定理

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} = \frac{a + c}{b + d} \qquad 5-11$$

得

$$\frac{i_a + i}{T - t} = \frac{i_a - i}{t} = \frac{(i_a + i) + (i_a - i)}{(T - t) + t} = \frac{2i_a}{T} \qquad 5-12$$

即

$$\frac{i_a - i}{t} = \frac{2i_a}{T} \qquad 5-13$$

从式5—13即可解得换向元件中的电流 i 随时间 t 的变化关系

$$i = i_a\left(1 - \frac{2t}{T}\right) \quad 5—14$$

式5—14告诉我们：在开始换向时，$t=0$，代入式5—14，得$i=i_a$，这与图5—1(a)的情况相符合。在换向结束时，$t=T$，代入式5—14，得$i=-i_a$，负号即表示了电流方向的改变，这与图5—1(c)的情况相符合。而在换向过程中，换向元件中的电流i与时间t是直线函数，变化关系如图5—2(a)所示。横座标表示时间t，纵座标表示换向元件中的电流i。当$t=0$时，电流在横座标上方，$i=+i_a$，这是换向刚开始时的情况。当$t=T$时，电流在横座标下方，$i=-i_a$，负号即表示电流方向的改变，这是换向结束后的情况。在换向过程中，换向元件中的电流i是按照直线规律变化的，所以称为直线换向。从图5—2(a)可以清楚地看到：当$t=\frac{1}{2}T$时，$i=0$。也就是说，对直线换向而言，当时间等于$\frac{1}{2}$换向周期，即换向过程进行到一半时，换向元件中的电流正好改变了方向。

式5—3告诉我们，在直线换向时，流经换向器片1与换向器片2的电流是与接触面积成正比例的。当换向过程快结束时，电刷即将与换向器片1脱离，S_1接近于零，i_1也接近于零，故不会发生火花，这是理想的换向过程。如果将式5—3改写一下，可以得到

$$\frac{i_1}{S_1} = \frac{i_2}{S_2} \quad 5—15$$

或 $$j_{b1} = j_{b2} \quad 5—16$$

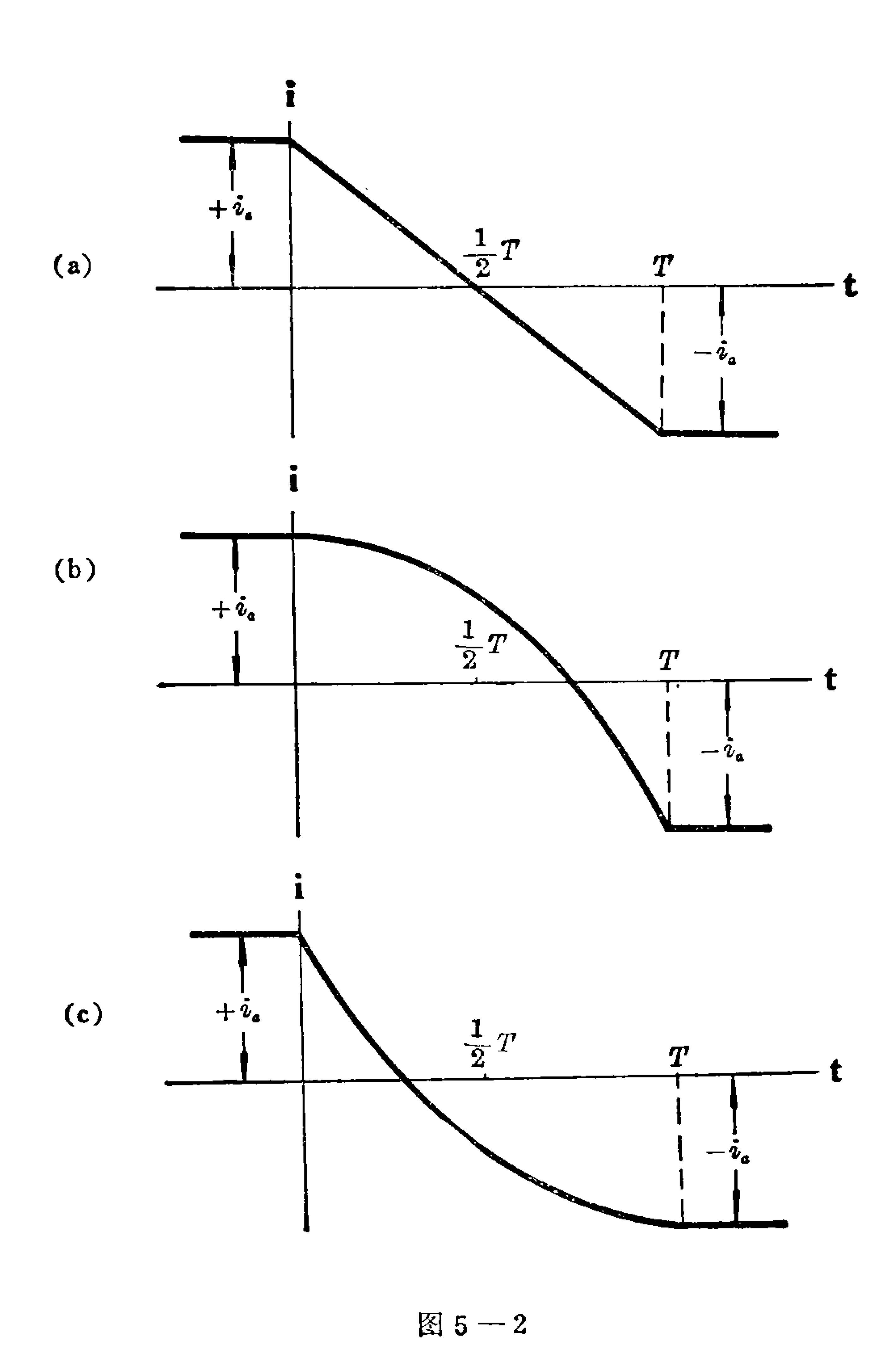


图 5—2

式中：

$j_{b1}=\frac{i_1}{S_1}$——后刷边电流密度。所谓后刷边是指换向器片离开电刷时所对应的电刷边〔图5—1(b)〕。

$j_{b2}=\frac{i_2}{S_2}$——前刷边电流密度。所谓前刷边是指换向器片进入电刷时所对应的电刷边〔图5—1(b)〕。

式5—16告诉我们，在直线换向时，前、后刷边电流密度相等。也就是说，直线换向时，在整个电刷的接触面上，电流密度是均匀分布的。

二、延迟换向

在上述讨论中，只考虑了接触电阻的影响，故又称为电阻换向。但实际上，换向元件中还有电抗电势的存在。由于电抗电势的影响，使得换向过程显著恶化，分析方法如下。

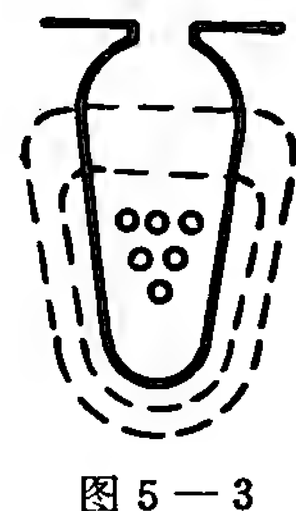


图5—3

转子元件是放在转子槽中的，当元件中流过电流时，在元件周围便会产生磁通（图5—3中虚线）。在换向过程中，元件中的电流是随时间而变化的，这样磁通便也随时间而变化。当磁通变化时，便在换向元件中产生了电势，这个电势就称为电抗电势。电抗电势的大小和性质也遵守电磁感应定律的一般规律，那就是：电抗电势的大小与电流变化的速率成正比，电抗电势的性质是力图阻止换向元件中电流i的变化，分别讨论于下。

1. 由于电抗电势力图阻止换向元件中电流i的变化，因

此，由于电抗电势的影响，换向元件中电流 i 改变方向的时间较直线换向为迟，故称为延迟换向，这时，换向元件中电流 i 的变化如图 5—2(b) 中曲线所示。比较图 5—2(a) 和(b) 可以看出：延迟换向时电流过零点的时间较直线换向为迟。也就是说，当 $i=0$，即换向元件中电流改变方向时，所经过的时间已经超过了换向周期的一半。

在讨论直线换向时，我们曾经提到，换向器片 1 与换向器片 2 的电流是与它们的接触面积成正比例的(式 5—3)。换向过程快要结束时，电刷与换向器片 1 即将分离，S_1 接近于零，i_1 便也为零，换向过程顺利结束，电刷下面不易出现火花。在延迟换向时，由于电抗电势力图阻止换向元件中的电流变化，因此换向元件中的电流总是力图保持原来的方向，从换向器片 1 流到电刷，而不能顺利地转到从换向器片 2 流到电刷。当换向过程快结束时，电刷与换向器片 1 即将分离，S_1 已接近于零，如果 i_1 还不为零，i_1 被强迫拉断，这样在后刷边便会出现火花。所以电抗电势过大，使换向过程过分的延迟，是电刷下面产生火花的一个主要原因，这种火花的特点是出现在后刷边。由于换向元件中的电流力图保持从换向器片 1 流到电刷，而不能顺利地转换到从换向器片 2 流到电刷，这样换向器片 1 与换向器片 2 的电流已不再与它们的接触面积成正比例，而是

$$\frac{i_1}{S_1} > \frac{i_2}{S_2} \qquad 5—17$$

即 $$j_{b1} > j_{b2} \qquad 5—18$$

也就是说：在延迟换向时，后刷边电流密度大于前刷边电流密度，在整个电刷下面，电流密度的分布是不均匀的。

2. 下面我们再来分析影响电抗电势大小的一些因素。电磁感应定律告诉我们电抗电势e_L的大小是正比于电流变化的速率，从图5—2(a)可以看出，在换向周期T时间内，电流从$+i_a$变化到$-i_a$，总的电流变化是$2i_a$，电流变化的平均速率应是$2i_a/T$，因此电抗电势e_L正比于$2i_a/T$。电磁感应定律还告诉我们，电抗电势e_L还正比于换向元件的电感L。因此电抗电势的平均值为

$$e_L = L\frac{2i_a}{T} \qquad 5—19$$

式5—19告诉我们下面三点重要的结论：

（1）电抗电势是正比于电枢电流的，电流越大，电抗电势也越大，换向将越困难。

（2）电抗电势还正比于电感L。电感又正比于匝数的平方，因此，换向元件的匝数越多，电感将越大，电抗电势也越大，换向也越困难。改善换向，削弱火花的措施之一，就是减少换向元件的匝数。在4—7节中讨论定、转子绕组匝数互相转移时，我们曾提到，定子匝数取多，转子匝数取少，换向情况改善，火花较小，就是这个道理。

（3）电抗电势是反比于换向周期T的。一个电机转速越高，换向周期将越短，电抗电势将越大，换向也将越困难。

三、提前换向

为了克服电抗电势的不良影响，所以一般电机都在几何中心线上另装一对换向极（图5—4）。任何一个元件经过几何中心线时都被电刷所短路，进行换向，产生电抗电势e_L，同时也切割换向极磁通而产生一个速度电势e_v。如果我们设

法令速度电势的方向与电抗电势的方向正好相反，那么，电抗电势具有妨碍电流i改变方向的性质，则速度电势一定具有帮助电流i改变方向的性质。如果电抗电势与速度电势大小正好相等，则可以互相抵消，得到直线换向。如果换向极过强，使得速度电势大于电抗电势，则在速度电势的帮助下，换向元件中的电流i将提前改变方向，因此称为提前换向。提前换向时，电流i随时间的变化关系如图5—2（c）所示。从图中曲线可以看出：当电流过零值，即当换向元件中的电流改变方向时，换向进行的时间还没有达到换向周期的一半。

由于速度电势具有帮助电流改变方向的性质，在速度电势的帮助下，换向元件中的电流提前改变了方向，或者说，换向元件中的电流很快转变为大部分由换向器片2流到电刷，这样换向器片1与换向器片2的电流也不再与它们的接触面积成正比例，而是

$$\frac{i_1}{s_1}<\frac{i_2}{s_2} \qquad 5—20$$

或者 $j_{b1}<j_{b2}$ 5—21

也就是说：提前换向时，前刷边电流密度大于后刷边电流密度，在整个电刷下，电流密度的分布也是不均匀的。

一般情况下，都希望电机略为具有一点提前换向（理由见5—4节）。但如果提前换向过分激烈，当前刷边的接触面积S_2还不够大时，电流已过早的转变为由换向器片2流到电刷，导致前刷边电流密度过大。尤其在换向刚开始时，前刷边只有少数几点与换向器片2相接触，过大的电流由此通过，会使该处电刷过热并发生火花。因此过度的提前换向，也

是电刷下面出现火花的一个原因，此时，火花发生在前刷边。

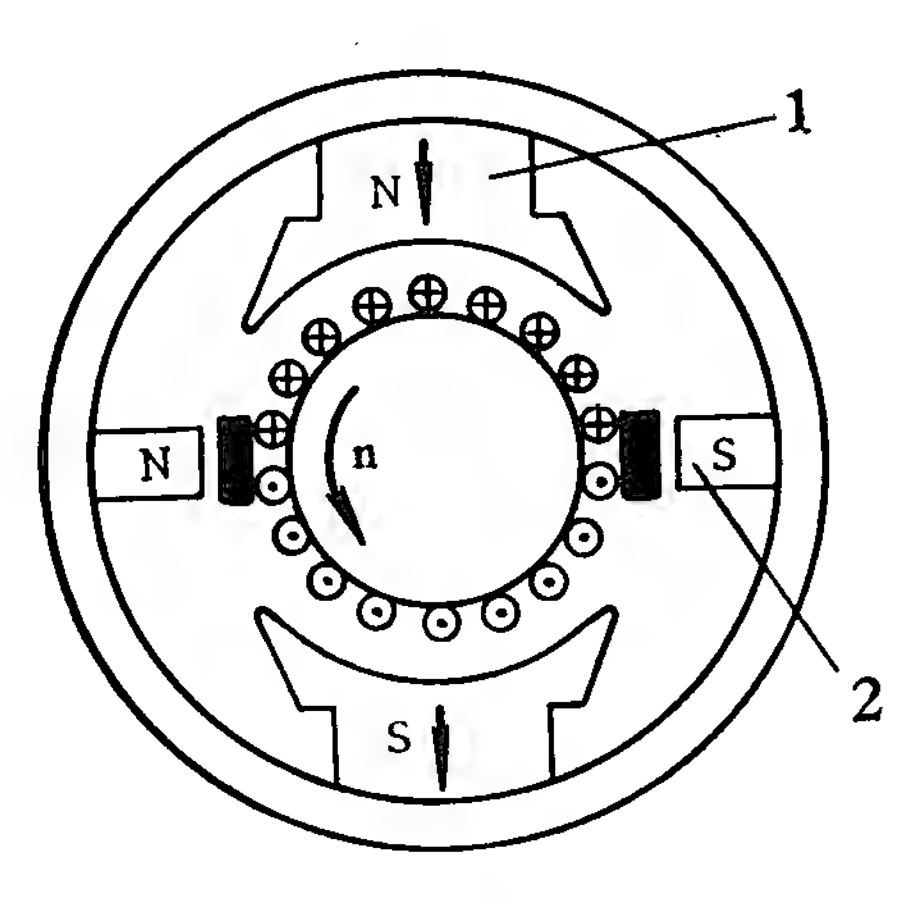
5—3 改善换向的方法

一、装换向极

换向极的构造如图 5 — 4 所示，它位于几何中心线上。讨论换向极时，主要是注意下面两个问题，即：（1）换向极的极性，（2）换向极绕组的接法。

1. 换向极极性

任何一个元件经过几何中心线时，都为电刷所短路，进行换向，同时也切割换向极磁通而产生速度电势 e_v。e_v 的作用是帮助换向元件中的电流改变方向，故 e_v 应与换向之后的电流同方向，根据这一原则可以决定换向极的极性，具体方法如图5—4所示。



1 —主磁极 2 —换向极

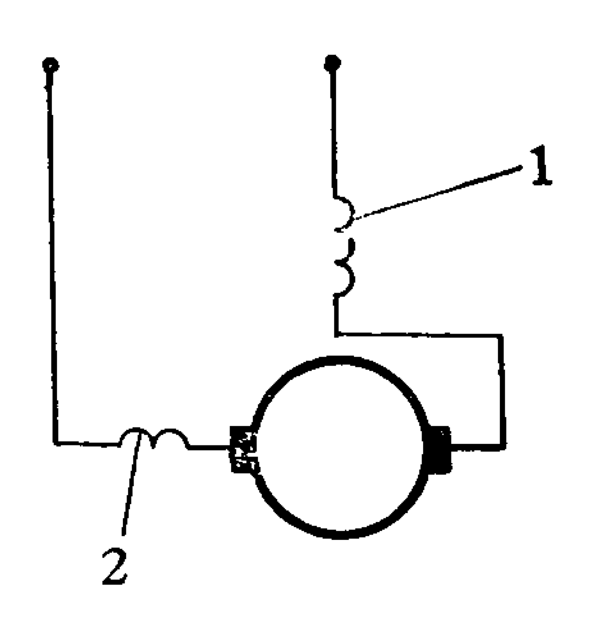
图5—4

按照图中所表示的主磁极的极性及电枢电流方向，根据电动机左手定则可知，电枢将逆时针方向旋转。此时左边电刷下的导体电流方向是：在换向前为流入纸面，在换向后为流出纸面。左边电刷下的导体切割换向极磁通所感应的速度电势方向，应

与换向之后的电流同方法，具体地讲，也应为流出纸面。由此，我们知道左边电刷所对应的换向极必为N极。因为当转子逆时针旋转时，左边电刷下的导体只有切割N极磁通，才能产生方向为流出纸面的电势，才能帮助换向过程的进行。因此，根据图5—4，可以得到如下结论，即：在电动机中，换向极应与元件换向前所处的主磁极同极性。

2. 换向极绕组的接法

由式5—19可知，电抗电势 e_L 与电流成正比。为了使速度电势 e_v 与电抗电势 e_L 在任何负载下都能互相抵消，速度电势 e_v 也应正比于电枢电流。所以换向极绕组必须与电枢绕组相串联(图5—5)，使换向极的磁通正比于电流，故切割换向极磁通而产生的速度电势 e_v 也会与电流成正比例。



1—激磁绕组　2—换向极绕组

图5—5

在5—2节讨论延迟换向时，我们已经知道，由于换向元件中存在着电抗电势，使换向情况恶化了。其实，妨碍换向的电势，除了电抗电势以外，还有电枢反应电势。电枢反应电势是如何产生的，也可以通过图5—4来分析。对图5—4这个具体电机而言，电刷上方的转子导体电流方向为流入纸面，电刷下方的转子导体电流方向为流出纸面，根据右手定则，转子绕组产生的磁势 F_a 的方向为自右向左（图5—6）。而换向极磁势的方向为自左向右，即转子磁势方向正好与换向极磁势方向相反。既然换向元件切割换向极磁通

所产生的速度电势具有帮助换向的作用，那么换向元件切割转子磁通所产生的电势总是起阻碍换向的作用，这个电势就称为换向元件中的电枢反应电势。电枢反应电势也需要借助于换向极来消除。

二、移动电刷位置

换向极是改善换向过程最有效的方法，在容量大于1个千瓦的电机中被广泛采用。但对小容量串激电动机而言，电机内部空间位置十分紧张，装置换向极是不可能的。此时，往往采用移动电刷位置的方法来改善换向。为什么移动电刷的位置可以改善换向过程呢？这还得从换向极的两个基本特点讲起。从上一小节的分析我们可以看出，要使换向极能够帮助换向，必须具备下面两个条件：（1）换向极应和元件换向前所处的主磁极同极性，（2）换向极绕组应和电枢绕组相串联。在串激电动机中，只要将电刷逆转向移动一个角

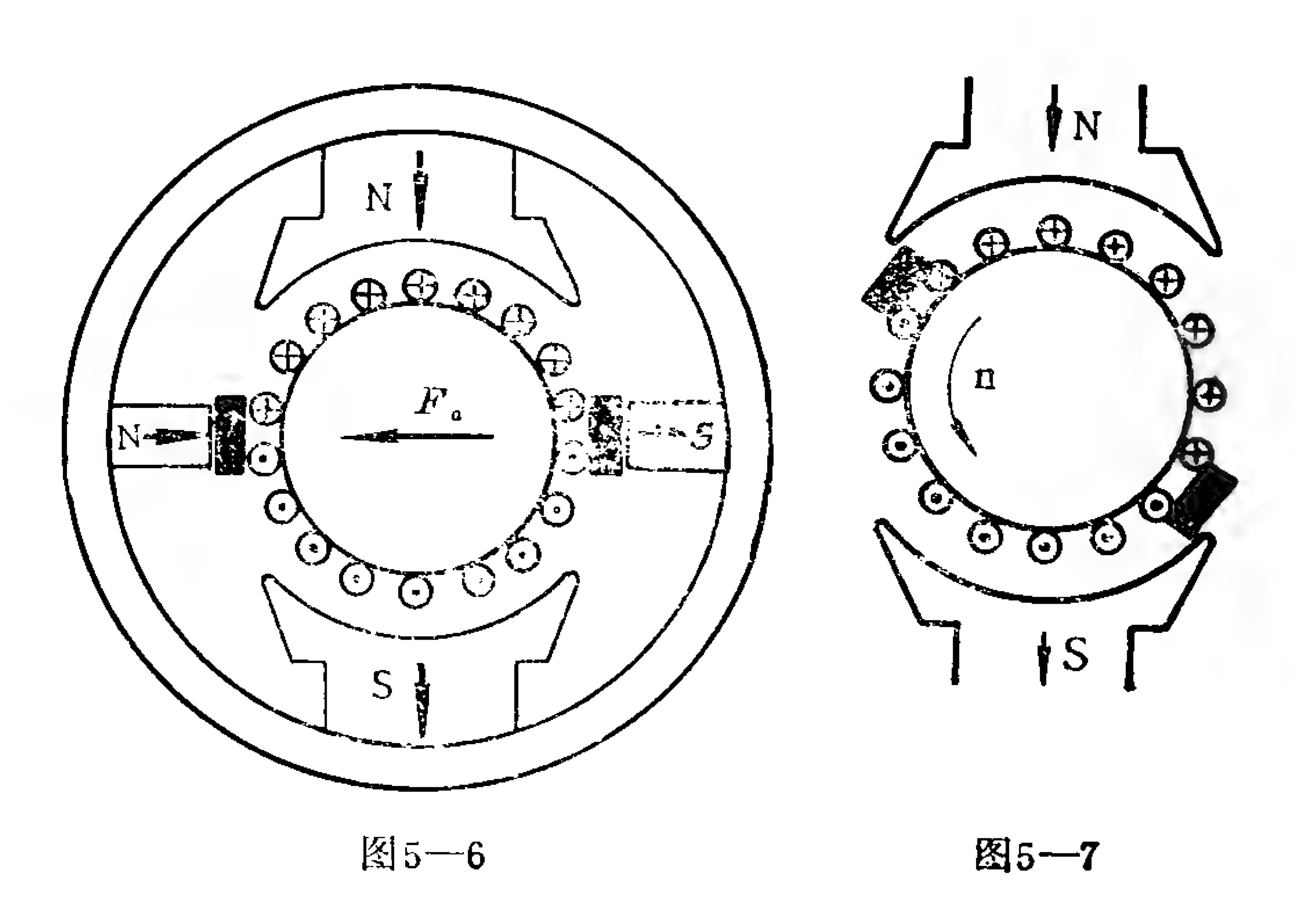


图5—6　　图5—7

度，则主磁极就可以代替换向极的上述两个作用。我们仍然以图5—4这个具体的例子来说明。换向极既然要和元件换向前所处的主磁极同极性，对图5—4这个具体例子来说，那就是左边这个电刷所对应的换向极应是N极，如果我们逆转向移动电刷，那换向元件便处于主磁极的N极之下（图5—7）。既然换向元件切割换向极N极磁通所感应的电势可以帮助换向，当然切割主磁极N极磁通所感应的电势也可以帮助换向，所以主磁极可以代替换向极的作用。此外，由于电抗电势正比于电流，为了保证在任何负载下，速度电势都与电抗电势相抵消，换向极绕组应和电枢绕组相串联。在串激电动机中，主极绕组就是与电枢绕组相串联的，这样主磁通在换向元件中所感应的速度电势，也正比于电流，也能在任何负载下都能与电抗电势相抵消。所以在串激电动机中，只要将电刷逆转向移动一个角度，主磁极完全能代替换向极的作用，帮助换向的进行。但移动的角度要适当，过大过小都是不行的。这是因为沿着空气隙各点磁阻不等，在极面下的磁阻较小，磁通密度较高（图5—8），如果移刷角度过大，换向元件切割的主磁极的磁通密度过高，产生的速度电势过大，使换向过分的提前，也会使电刷下边出现火花。而在两个主磁极之间，磁阻较大，磁通密度较低，如果移刷角度过小，换向元件切割的主极磁的磁通密度很低，产生的速度电势很小，不足以抵消电

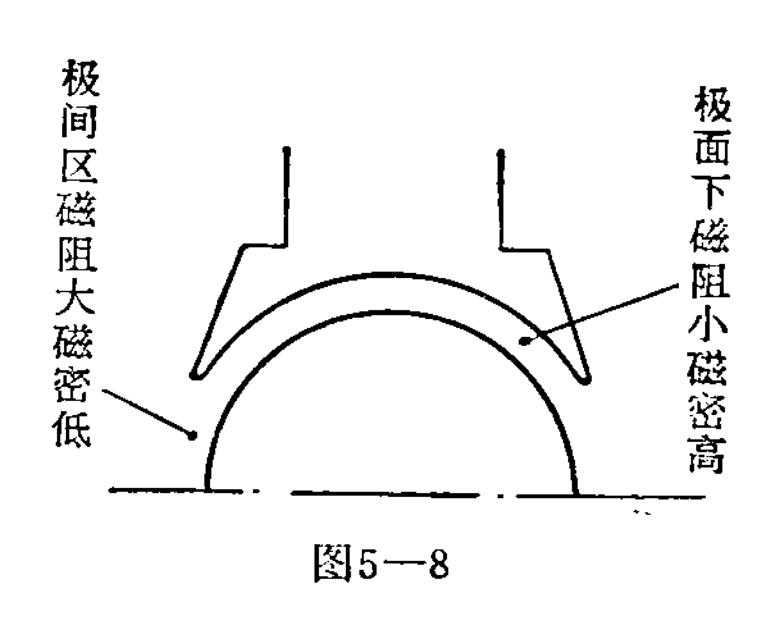


图5—8

抗电势，换向变得落后，电刷下面也会出现火花。所以移刷的角度一定要适当，才能帮助换向进行。

在串激电动机中，电刷逆转向移动一个角度后，主磁极完全可以代替换向极的作用，使换向过程得到改善，但电刷偏离几何中心线以后会产生去磁反应，这个道理可以通过图5—9来说明。其中图5—9（a）是电刷逆转向移动以后转子导体的电流分布情况。图5—9（a）可以看成是图5—9（b）及图5—9（c）的合成。因为只要将图5—9（b）及图5—9（c）的转子导体重合到一起，便可以得到图5—9（a）所表示的转子导体电流分布情况。在图5—9（b）中，右边四根导体电流是流入纸面的，而左边四根导

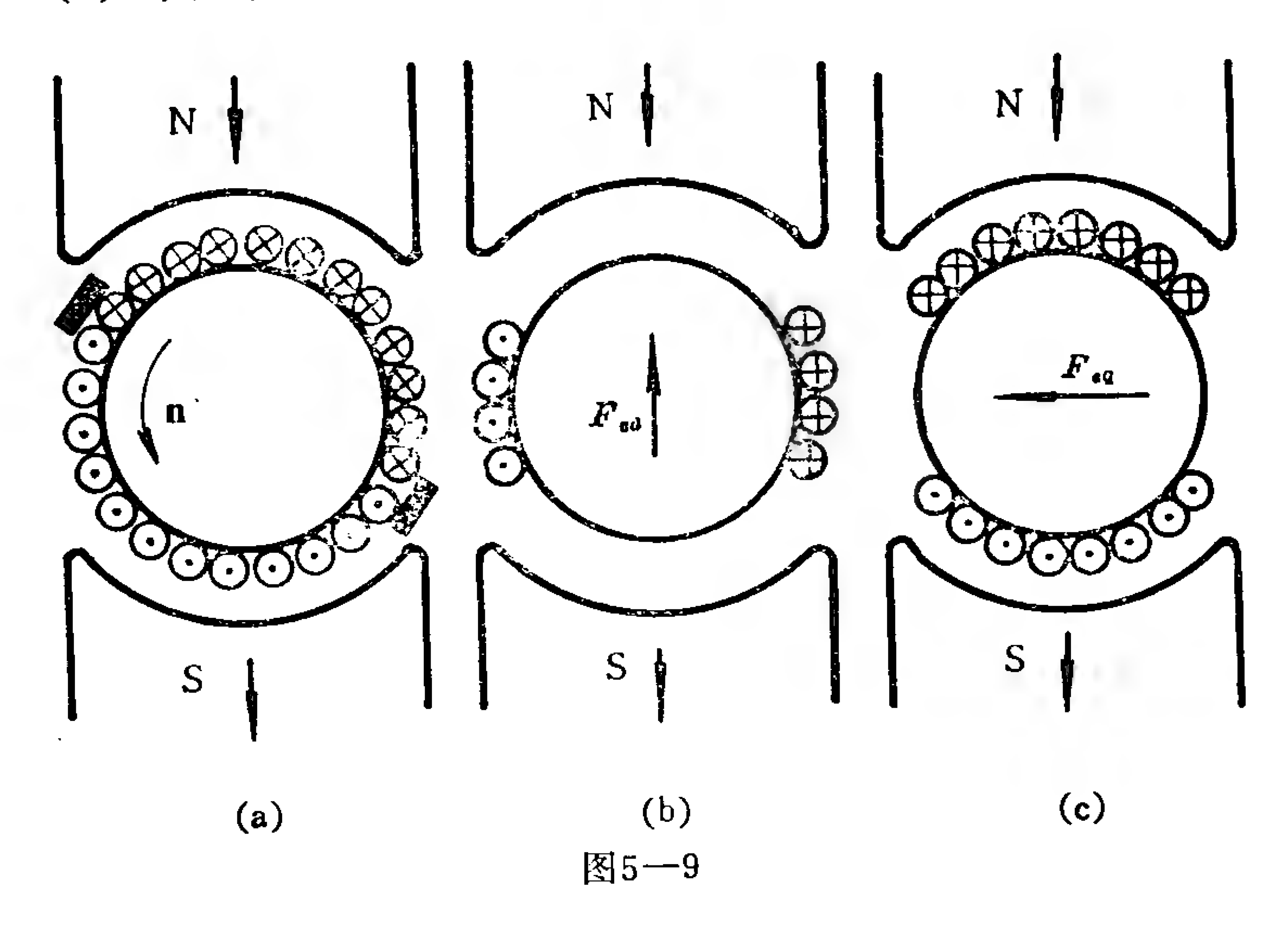


图5—9

体电流是流出纸面的，根据右手定则，这8根导体产生的磁势与主极磁势相重合，称为直轴电枢磁势 F_{ad}。从图5—9(b)

可以看出，在电动机中，当电刷逆转向移动后，直轴磁势 F_{ad} 起去磁作用。在图 5 — 9 （c）中，上面 8 根导体电流为流入纸面，下面 8 根导体电流为流出纸面，根据右手定则，它们产生的磁势与主极磁势正交，称为交轴电枢磁势 F_{ag}。在串激电动机中，当电刷逆转向移动后，由于直轴磁势的去磁作用，使得在同一电流下，电机内部的主磁通 ϕ 减少，这就使得电机的性能发生变化，例如从式 3 —28可以看出，主磁通减少的结果，电机的转速便升高。

最后还须指出一点：在电动机中，只有当逆转向移动电刷时，换向元件中产生的速度电势方向才能与电抗电势方向相反，才能帮助换向过程的进行。如果顺转向移动电刷，由于主磁极的极性反过来了，此时换向元件中产生的速度电势便与电抗电势同方向，速度电势与电抗电势一起对换向过程起阻碍作用，电刷下面便会出现强烈的火花。这就告诉我们，在用移动电刷改善换向的电机中，电刷固定以后，电机的转向也就固定了，转向是不能任意改变的。例如在图 5 — 7 中，电刷的位置固定以后，电机逆时针旋转时，是逆转向移动电刷，可以改善换向过程。当电机顺时针旋转时，是顺转向移动电刷，换向过程便会恶化，所以转向是不能任意改变的。

三、移动元件到换向器片的焊头位置

1. 改善换向的原理

前面曾经提到，装置换向极是改善换向过程、消除火花最有力的措施，1 千瓦以上的电机中均广泛采用。但是，对我们现在所研究的小容量串激电动机而言，空间位置十分紧张，没有足够的地方来装置换向极，此时就可以逆转向移动电刷来改善换向，以主磁极来代替换向极的作用。不过，由于结

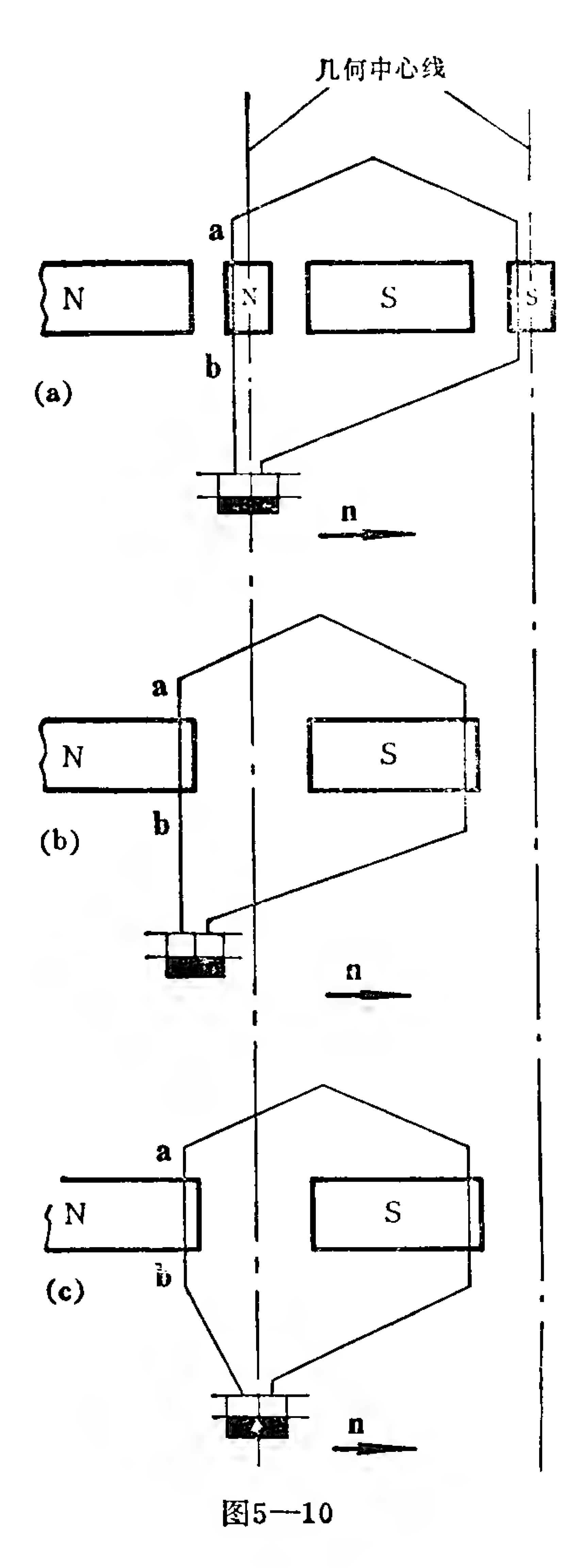


图5—10

构及工艺上的原因，电刷的位置往往又必须放置在几何中心线上，而不允许逆转向移动，此时就必须顺转向移动每个元件到换向器上的焊头位置来改善换向了。因此存在着三种改善换向的方法，即：（1）装置换向极，（2）逆转向移动电刷，（3）顺转向移动元件到换向器片的焊头位置。这三种方法是互相联系，逐步发展起来的，它们之间的关系表示在图5—10中。

在图5—10中，元件为电刷所短路，是正在进行换向的情况。其中图（a）是装置换向极来改善换向过程的图形。在以图5—4来分析换向极极性时，我们曾经

得到过一个一般性的结论，即：在电动机中，换向极应和元件换向前所处的主磁极同极性。在图5—10(a) 中，假定转子旋转方向从左向右，对ab这一根导体来说，换向前处于主磁极N极之下，所以在换向过程中，切割的换向极磁通也应是N极。图5—10(b)是逆转向移动电刷来改善换向过程的图形。既然在图5—10(a) 中，导体ab切割换向极的N磁通可以改善换向，那么在图5—10(b)中，导体ab切割主磁极的N极磁通也可以改善换向。逆转向移动电刷实际上就是以主磁极来代替换向极的作用。图5—10(c) 是顺转向移动元件到换向器片的焊头位置来改善换向的图形。比较图5—10 (b)和(c)可以清楚地看到：在这两个图形中，元件都被电刷所短路，都是换向过程正在进行之中的情况。而且在这两个图形中，元件相对于主磁极的位置完全一样，因此在这两种情况下，元件切割主磁通所感应的电势，都能帮助换向过程的进行。但是在图5—10 (b) 中，电刷的位置已偏离了几何中心线，而在图5—10 (c) 中，由于顺转向移动了元件到换向器片的焊头位置，电刷仍然位于几何中心线上。所以顺转向移动元件到换向器片的焊头位置，是由逆转向移动电刷发展而来的，两种方法改善换向过程的基本道理是完全一样的。现在生产的小容量串激电动机，绝大多数都是用移动元件焊头位置的方法来改善换向过程的。

在分析用逆转向移动电刷的方法来改善换向时，我们曾经谈到，由于转子绕组的去磁作用，使电机性能发生变化。由于顺转向移动元件到换向器片的焊头位置和逆转向移动电刷，在本质上是一样的，所以逆转向移动电刷对电机性能产生的影响，在顺转向移动元件到换向器片上的焊头位置中同

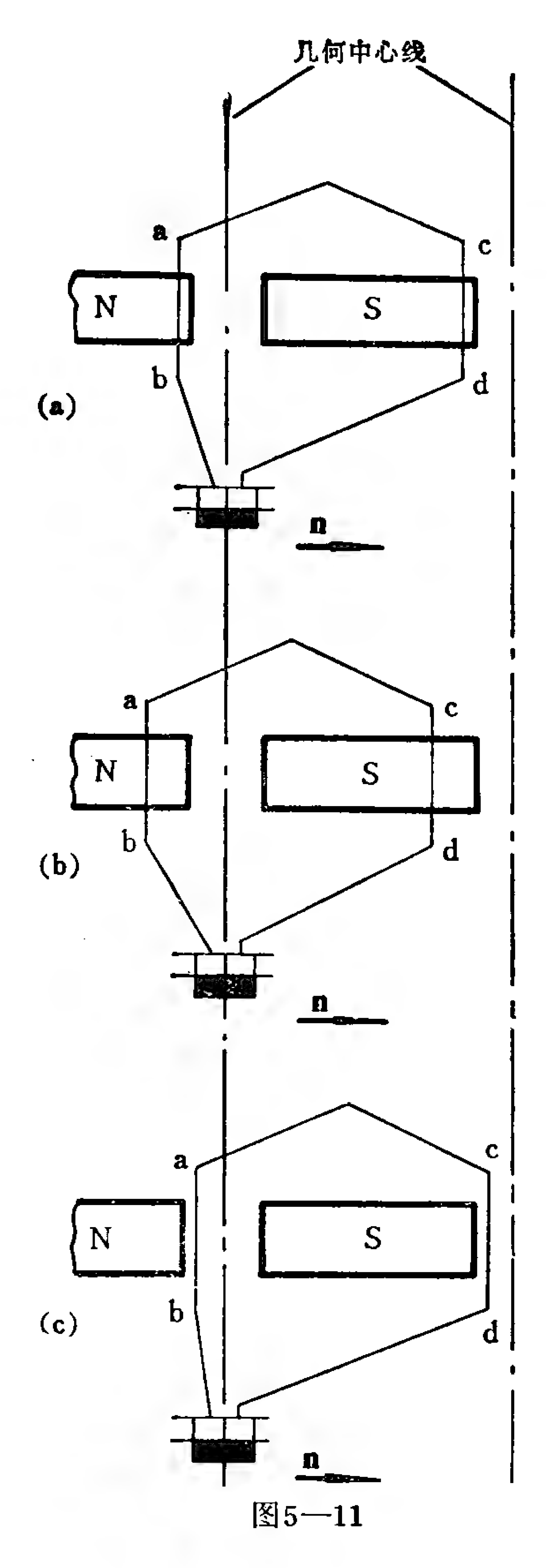


图5—11

样存在。

我们说顺转向移动元件到换向器片的焊头位置，可以帮助换向过程的进行，但移动的距离一定要恰当，否则仍然会产生火花，这个道理可以通过图5—11来解释。在图5—11（a）中，导体ab切割N极磁通感应一个速度电势，导体cd切割S极磁通也感应一个速度电势，这两个速度电势之和应能抵消元件在换向过程中产生的电抗电势，以得到直线换向。如果元件到换向器片的焊头位置顺转向偏移太多，便得到图5—11（b）。此时导体ab与cd分别向N极及S极中心方向移动。在图5—8中我们已经谈到，极面下磁阻小，磁密高，导体ab及cd处于极面下之后，切割的磁通磁密度高，产生的速度电势也大，

这样速度电势便可能大于电抗电势，而得到提前换向。过分的提前换向也可能使电刷下面出现火花。因此元件到换向器片的焊头位置不能顺转向偏移太多。但是，也不能偏移太少，如果偏移太少，便得到图5—11(c)，此时，导体ab及cd离开磁极而向几何中心线的方向移动，在图5—8中我们也曾经谈到，极间区磁阻大，磁密低。如果导体ab及cd离开磁极边缘过远，切割的磁通密度过低，产生的速度电势过小，这样速度电势便可能小于电抗电势，而得到延迟换向，过分的延迟换向是电刷下出现火花的主要原因，所以元件到换向器片的焊头位置也不能顺转向偏移太少。究竟偏移多少为恰当，这需要一定的经验，在修理电机时我们可参照附图—1到附图—25的数据来选取。

但是，是否所有的电机都一定要顺转向移动元件到换向器片的焊头位置才可以改善换向呢？也不尽然。例如在附图—13及附图—17中，就存在逆转向移动元件到换向器片焊头位置的情况。这是由于元件短距所引起的，具体的理由分析如下。

2. 元件短距的影响

我们通过图5—12来解释元件短距的影响。其中图5—12（a）是一个全距元件，导体ab切割N极磁通（假定N极磁通方向为流入纸面），产生一个方向向上的速度电势，导体cd切割S极磁通（假定S极磁通方向为流出纸面），产生一个方向向下的速度电势。如果元件到换向器片的焊头位置偏移得适当，这两根导体速度电势之和正好与换向过程中的电抗电势相抵消，得到直线换向。如果保持焊头位置不变，而采用短距元件，便得到图5—12（b）。从图5—12（b）

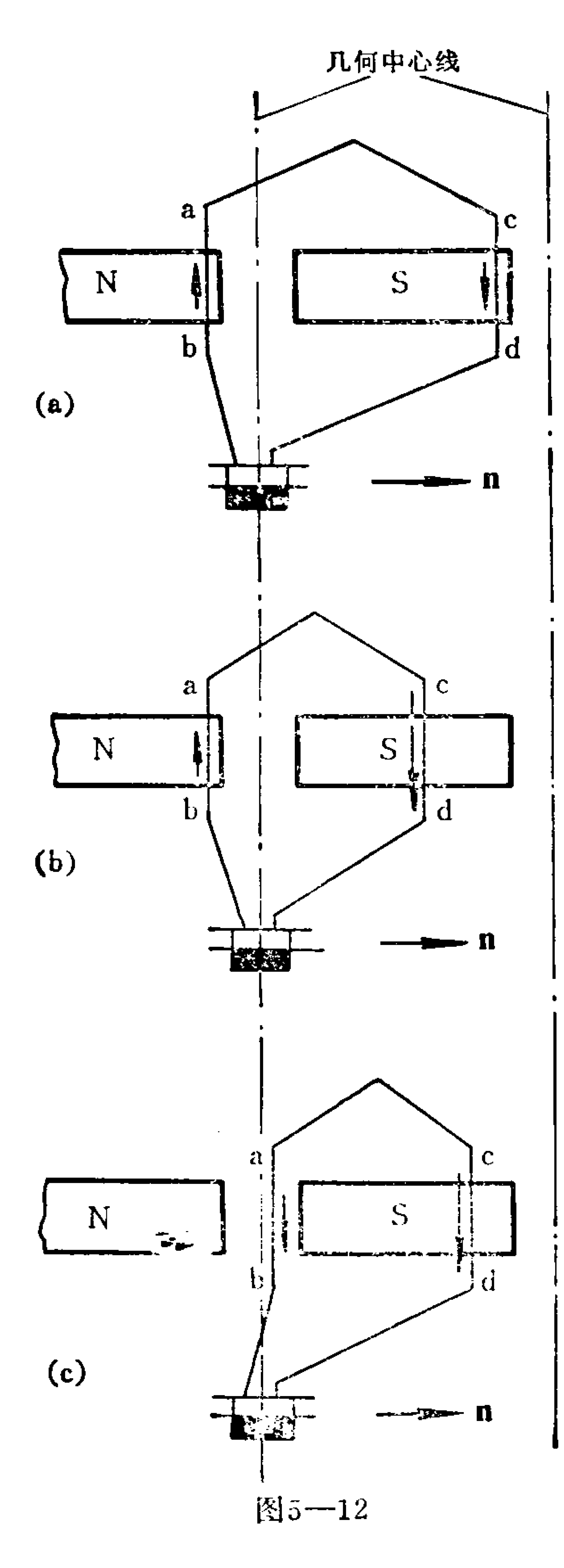


图5—12

可以看出，导体ab的位置仍然同图5—12（a）的情况一样，切割主磁通所产生的速度电势大小不变。但是，由于短距的缘故，使导体cd向S极的中心方向移动。前面我们已经谈到，磁极中心处比磁极边缘部分磁通密度要高，因此，短距时导体cd切割的磁通密度高，产生的速度电势大，这样速度电势便大于电抗电势，使得换向提前。因此，同样一个大小的元件到换向器片的偏移距离，如果对全距元件正好，对短距元件就会太大，对全距元件得到直线换向，对短距元件就会得到提前换向，过分的提前换向也会使电刷下面出现火花。为了抵消导体cd产生过大速度电势的影响，我们就应该逆转向移动元件到换向器片的焊头位置，这样便得到了图

5—12（c）。比较图5—12（b）及（c）可以看出，由于逆转向移动了元件到换向器片的焊头位置产生了两个后果，一是使导体cd向磁极边缘方向移动，使它切割的磁通密度减少，以减少它产生的速度电势。其二是使导体ab也处于S极下，也产生一个方向向下的速度电势，以使整个短距元件的速度电势降低。所以对于采用短距元件的电机来说，由于短距程度及换向情况的不同，有些是顺转向移动元件到换向器片的焊头位置，但也有些是逆转向移动元件到换向器片的焊头位置，目的都是一个，以产生适量的速度电势来抵消电抗电势的影响。

3.关于正反转电机

一般情况下，用移动元件到换向器片焊头位置的方法来改善换向的电机，是不允许反转的，如果反转，换向情况便会恶化，容易产生火花，这个道理可以通过图5—11（a）来解释。如果转子旋转方向从左向右，此时是顺转向移动元件到换向器片的焊头位置。导体ab与cd分别切割换向前的主极磁通，此时所产生的速度电势，它的方向和电抗电势方向相反，可以抵消电抗电势的影响而得到直线换向。如果转子反方向旋转，即旋转方向是从右向左，此时便是逆转向移动元件到换向器片的焊头位置了，导体ab与cd分别切割换向后的主极磁通，所产生的速度电势，它的方向便和电抗电势一致，和电抗电势一起恶化换向过程，使电刷下出现火花。所以，一般情况下，是不允许反转的。如果电机必须正、反转，则元件到换向器片的焊头位置，可按照图5—13（b）的方法来考虑。

首先我们看图5—13（a），这是一个全距元件，这个

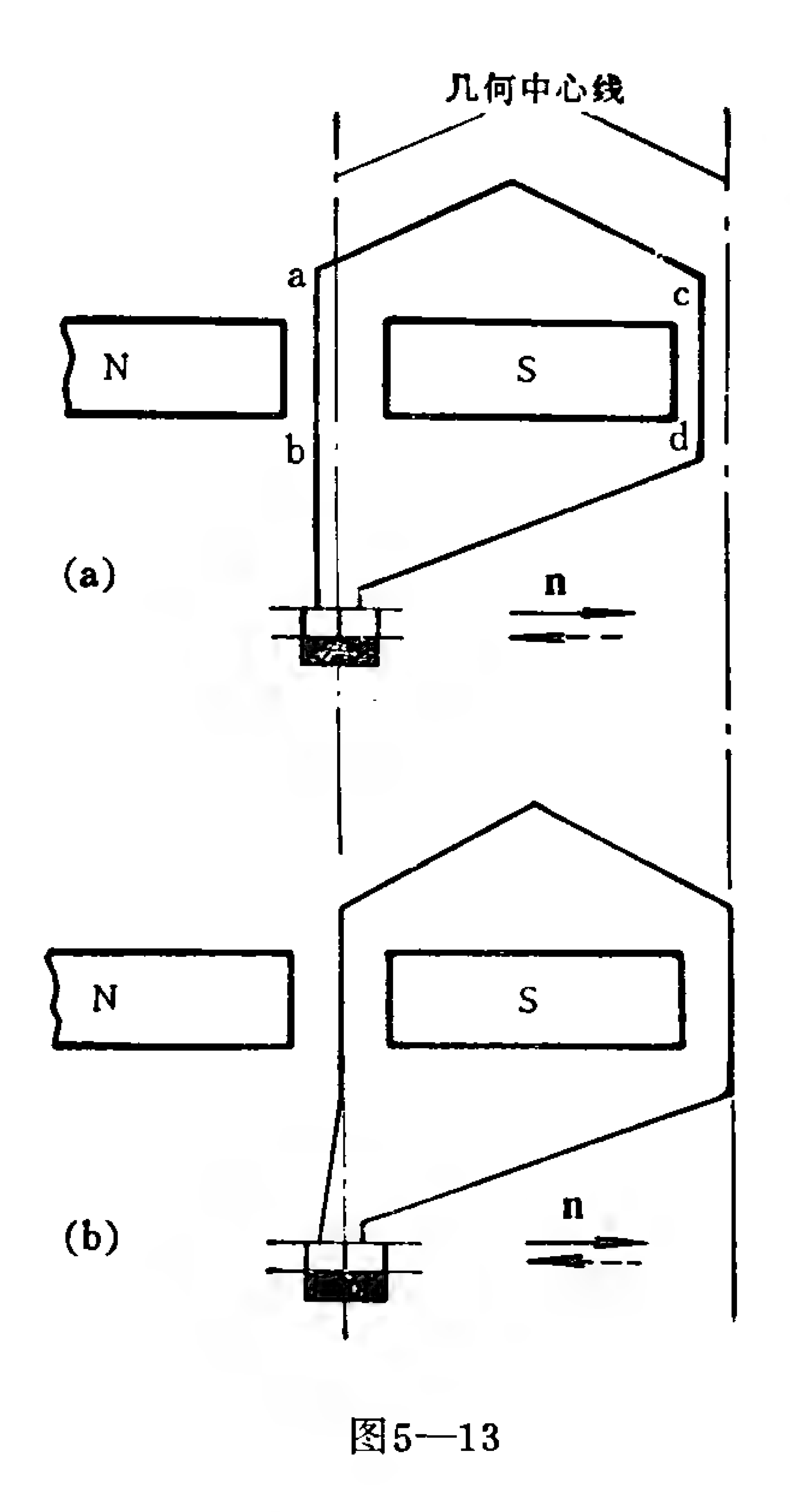


图5—13

元件到换向器片上的焊头位置未发生偏移，它正为电刷所短路，是换向正在进行中的情况。如果转子旋转方向是从左向右（实线箭头），则导体ab与cd分别切割换向前的主极磁通，所产生的速度电势，它的方向与电抗电势方向相反，可以抵消电抗电势的影响，使换向过程改善。如果转子反方向旋转，即旋转方向是从右向左（虚线箭头），此时导体ab与cd分别切割换向后的主极磁通，所产生的速度电势，它的方向便与电抗电势相同，即速度电势将与电抗电势一起恶化换向过程。所以对需要正、反转的电机而言，如果元件到换向器片上的焊头位置不发生任何偏移，则两种转向下的换向情况是不一样的。为了使两种转向下，换向情况一样，元件到换向器片的焊头位置必须采用图5—13（b）所示的偏移方法，即逆着绕组缠绕方向偏移一个角度。在图5—13（b）所示的这一瞬间，换向过程进行了一半，此时，元件两边都位于几何中心线上，在这种情况下，不论转子朝那边旋转，所

产生的速度电势都是一样的，因此在两种转向下，换向过程也就一样了。在图5—13（b）中，我们是以全距元件为例，说明了在正、反转电机中元件到换向器片焊头位置的偏移方法。如果是短距元件，则元件到换向器片焊头位置，应逆着缠绕方向偏移一个较大的角度（见附图—15、附图—16及附图—19）。短距元件的分析方法，同图5—12及图5—13情况类似，此地就不再重复了。

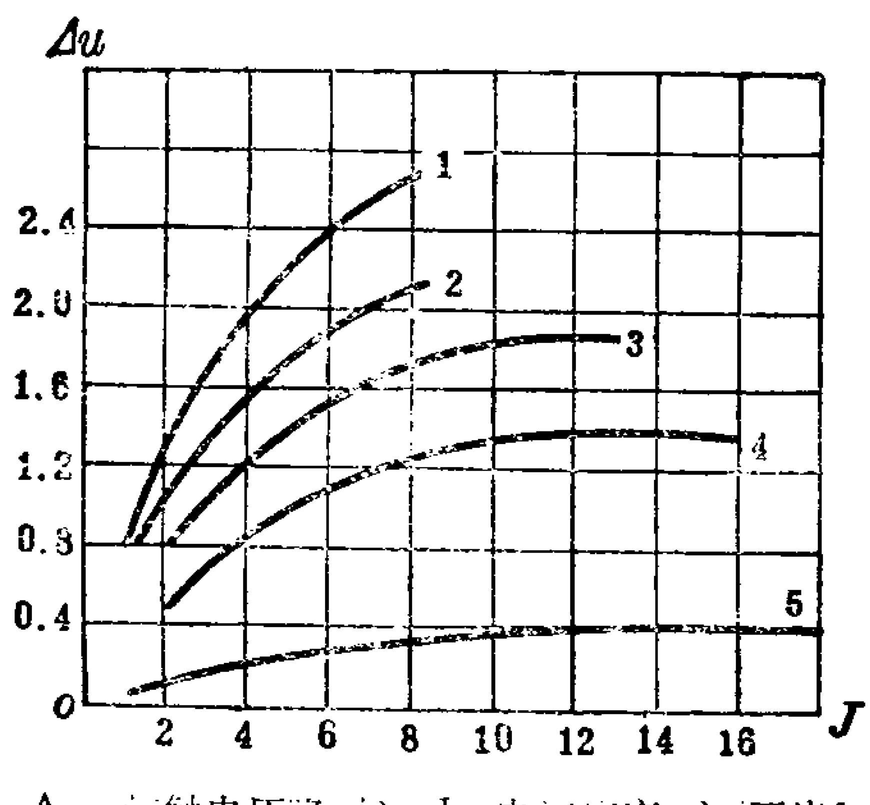
四、选用合适的电刷

在5—2节中我们已经谈到，假如只考虑电刷与换向器片之间的接触电阻，得到的是直线换向，电刷下面不易出现火花，是比较理想的换向过程。但由于电抗电势的存在使得换向过程延迟了，过分的延迟换向是电刷下面产生火花的一个重要因素。式5—19告诉我们：电感L越大，电抗电势e_L便越大，换向过程就越延迟。因此，只考虑电刷与换向器之间的接触电阻，得到的是直线换向，考虑电感以后，得到的便是延迟换向了。换向的延迟程度由换向回路中电阻和电感的比值来决定，如果增加电刷与换向器片之间的接触电阻，相对地便削弱了电感的影响，使换向过程接近于直线换向，有利于消除火花。增加接触电阻最有效的方法是选用硬质电刷，电刷越硬，它的接触电阻也越大。

电刷与换向器片之间的接触电阻越大，它们之间的接触电压降也越大，影响接触电阻或接触电压降的因素很多，大致有下面几点。

1.电刷材料

从材料上区分，电刷可以分为四类，即：铜石墨电刷、碳石墨电刷、石墨电刷、电化石墨电刷。一般来讲，碳石墨



Δu—接触电压降，伏 J—电流密度，安/厘米²
图5—14

电刷最硬，接触电阻也最大，其次是石墨电刷及电化石墨电刷，铜石墨电刷接触电阻最小。图5—14表示了电刷接触压降与电流密度的关系。其中曲线1、2是硬质电刷，曲线3、4是中等硬度及软质电刷，曲线5是铜石墨电刷。由于电流从金属流向电刷时，接触压降大；电流由电刷流向金属时，接触压降小，因此图中所表示的是一对电刷接触压降之和。从曲线3、4、5可以明显地看出，当电流密度增加到一定数值以后，接触压降几乎不变。这就意味着：当电流密度增加到一定程度后，电流继续增加，接触电阻便反比例地减少。这个理由很好解释，因为根据欧姆定律，U＝IR，如果U等于常数，保持不变，那么当I增加时，R一定在减少。

2. 温度的影响

随着温度的增加，接触电阻会逐渐减少。因此有些电机在冷态时换向情况较好，但运行时间一长，温度升高，换向情况便会恶化。略为大一点的电机，一个刷杆上如果有两个电刷，这两电刷一定要选用同一牌号，如果选用不同牌号的电刷，则接触电阻小的电刷流过的电流便大，因而温度升高。温度升高以后，接触电阻更小，电流更大，温度更升高。如

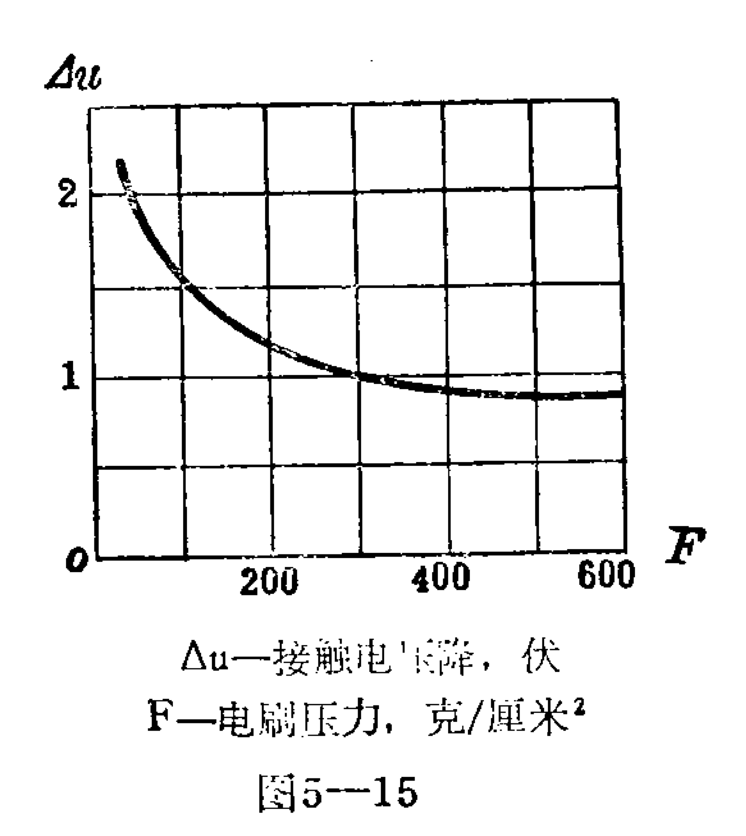
此恶性循环，最后可能会导致电刷的烧毁。

3. 氧化层的影响

换向器表面的化学性质对接触电阻的影响很大，长期工作的电机，换向器表面会形成薄薄的氧化层，这会提高换向器表面的硬度，使其耐磨，并增加其接触电阻使得换向过程比较理想。如果换向器表面还保持它原来的颜色，显得没有光泽，这就说明，它还没有达到为保证良好换向所必须的稳定状态。

4. 电刷压力的影响

电刷压力对电刷接触电压降的影响如图5—15所示。曲线清楚地表明了，开始一段，随着压力的增大，接触电压降下降。但压力继续增加，接触电压降几乎不变了。与接触电压降相对应的是接触电阻，因此图5—15的曲线也表示了接触电阻随压力的变化关系。



Δu—接触电压降，伏
F—电刷压力，克/厘米²
图5—15

5. 转速的影响

换向器的周边线速度对接触电阻的影响不大。不过速度提高以后，如果引起电刷跳动，这也会使接触电阻显著的增加，但这反而对换向过程不利。

从上面的分析可以看出，电刷的性能及工作状态对换向及火花影响很大。一种牌号的电刷在某一电机上使用虽然极不满意，但在另一种电机上使用却能得到满意的换向。每一种类型的电机都有其合适的电刷，即令是同一台电机在不同

的地区或不同的工作环境下使用，有时也需要更换不同牌号的电刷才能得到满意的换向。因此，换向困难的电机所采用的电刷，往往需要经过现场的实际试验和运行后才能确定。在需要更换电刷时，应尽可能选用原来牌号的电刷，以利电机的正常运行。

五、削弱互感电势的影响

首先我们看互感电势是如何产生的，以及它对换向过程会带来怎样的影响。

1. 槽中并列元件引起的互感电势

我们研究换向过程时，为了分析问题简单，在图5—1中，假定电刷的宽度恰好等于一个换向器片的宽度，这样当换向器旋转时，总是只有一个元件为电刷所短路，也就是说，总是只有一个元件在进行换向。但实际上电刷的宽度总是大于换向器片的宽度，这样有时电刷就要短路两个元件，也就是说，有些时候是两个元件同时进行换向的（图5—16）。这两个元件如果处于同一槽中，那它们产生的磁通会互相匝链（图5—17）。这样当第一个元件换向时，它所引起的磁通变化，会在第二个元件中感应电势。同样当第二个元件换向时，它所引起的磁通变化，也会在第一个元件中感应电势，

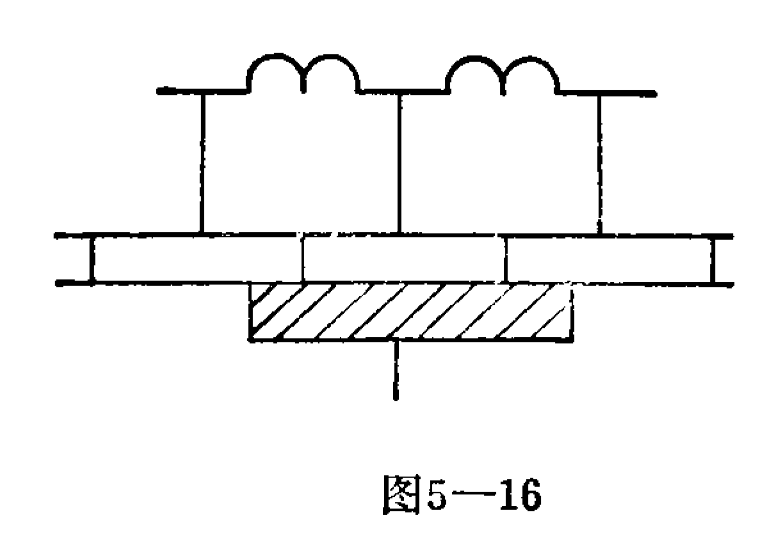


图5—16

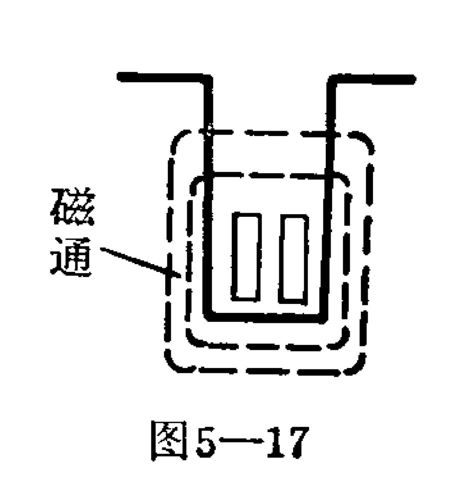


图5—17

这种电势就称为互感电势。由于互感电势的存在会使电抗电势增加，换向情况便会恶化。减少这种互感电势最有效的办法是减少每槽的并列元件数 U_Z（即虚槽数，见图 4 — 5 ）。因为一个槽中如果只并列两个元件，那只有第二个元件能在第一个元件中产生互感电势。如果一个槽中并列三个元件，而这三个元件又同时换向，那第二个、第三个元件都会在第一个元件中产生互感电势，第一个元件中的电抗电势自然就大了。所以减少互感电势最有效的方法就是减少一个槽中的并列元件数 U_Z。但在保持元件数不变的情况下，减少一个槽中的并列元件数，就必须增加槽数。但槽数过分增加，又会带来工艺及材料能否充分利用的问题，现在生产的串激电机，一个槽中的并列元件数一般为 2 或 3 。

在上面分析中，我们说增加了电刷宽度，同时进行换向的元件就多，互感电势就大，不利于换向，那能否得出一个结论，电刷越宽，换向过程越不利呢？也不能这么说，从图 5 — 1 的分析可以看出，电刷越宽，换向进行的时间也越长，即换向周期 T变大，换向元件中电流变化的速率便减慢。而电磁感应定律告诉我们，电抗电势是正比于电流变化的速率的，换向元件中电流变化的速率减慢了，换向元件中的电抗电势也就减少了。这个结论从式 5 —19也可以看出，当换向周期 T增大时，电抗电势 e_L 自然就小了。从这个角度看，增加电刷的宽度又是有利的。比较全面的结论应该是：（1）当其他条件不变时，减少每个槽中的并列元件数对换向有利；（2）当一个槽中并列元件数一定时增加电刷的宽度对换向有利，此时由于几个元件同时换向而产生的互感电势的影响，不如由于换向周期变长而使电抗电势减少的影响大。当然，

电刷宽度也不能任意增加，电刷宽度增加以后，也会带来性能上其它不良后果，此地就不再分析了。

上面所说的互感电势，是由于一个槽中并列的几个元件同时进行换向而引起的。除了这种互感电势之外，还有下面将要分析的另一种互感电势。

2. 槽中上、下层元件边之间的互感电势

当一个槽中的上、下层元件边同时进行换向时，也要产生互感电势，这个道理可以通过图5—18来解释。

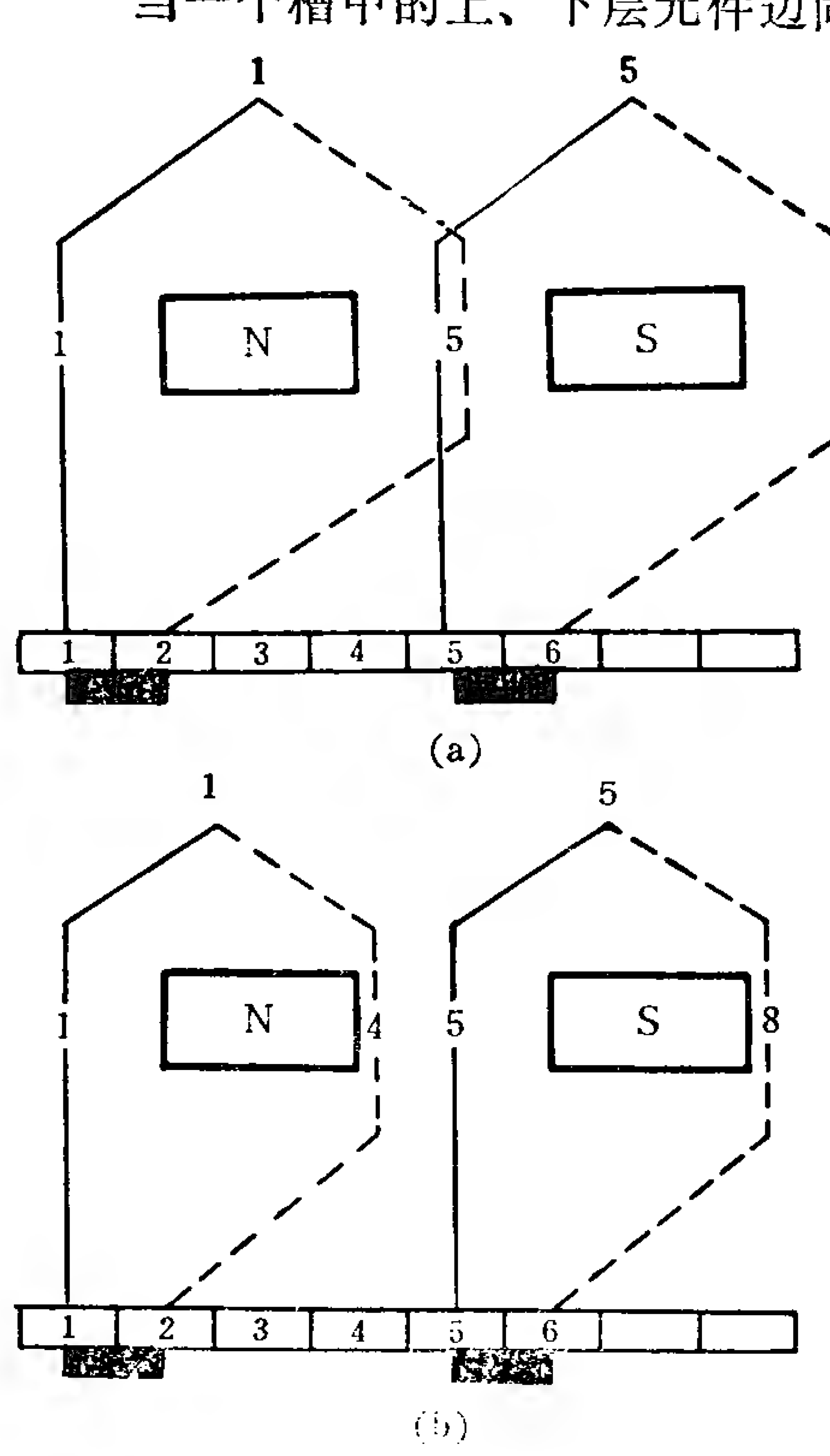


图5—18

图5—18（a）实际上是图4—6的略图，图中只画出了正在进行换向的两个元件；把那些与我们分析换向过程无关的元件都省去而未表示出来。为了说清楚一个槽中上下层元件边互感电势的影响，我们把图5—18（a）的主要特点再重新提一下。这是一个两极电机，即 $2p=2$，一共有8个槽，即 $Z=8$，因此极距 τ——

即定子一个磁极所跨过的距离（图4—3）应为$\tau=\frac{Z}{2p}=\frac{8}{2}=4$个槽。由于我们采用全距绕组，因此一个元件两边之间的距离$y_1=4$个槽，即元件跨距是1—5槽。因此在N极下，元件的一个边在第一个槽中，另一个边必在第5个槽中〔图4—6及图5—18（a）〕。在S极下，元件的一个边在第5个槽中，它的另一个边必在第1个槽中〔图4—6及图5—18（a）〕。每个元件的两个边之间所跨过的距离都是4个槽，即$y_1=\tau=4$个槽。由于这两个元件都为电刷所短路，换句话说，这两个元件在同时进行换向。从图5—18（a)可以看出，对全距元件而言，同时进行换向的两个元件，它们的上、下层元件边同处在一个槽中。例如第一个元件的第二边和第5个元件的第一边同处于第5个槽中，而第5个元件的第二边和第一个元件的第一边则同处于第一个槽中。同处于一个槽中的上、下层元件边，它们所产生的磁通互相匝链(图5—19)，这样在换向过程中便产生互感电势。具体地讲，以第5个槽为例，N极下元件换向时，它的第二边所引起的磁链变化，会在S极下元件的第一边中感应电势〔图5—18（a)〕。同样，S极下元件换向时，它的第一边所引起的磁链变化，会在N极下元件的第二边中感应电势。这种互感电势也会使换向元件中总的电抗电势增加，而使换向恶化。

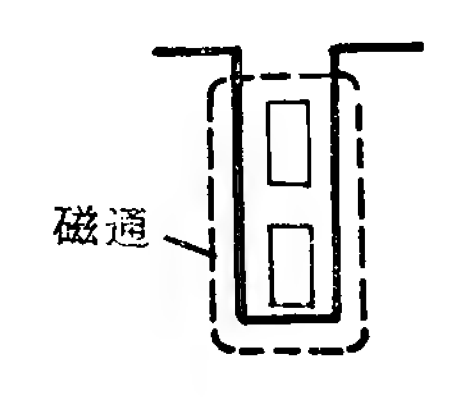


图5—19

消除这种由于上下层元件边同时进行换向而引起的互感电势最有效的方法，是采用短距元件。在图5—18(b）中，

如果令 $y_1<\tau$，即取 $y_1=3$ 个槽，那么元件的跨距是 1 — 4 槽。即 N 极下的元件，它的一个边在第一个槽中，另一个边则在第 4 个槽中。对 S 极下元件而言，它的一个边在第 5 个槽中，另一个边则在第 8 个槽中。这样同时进行换向的两个元件，它们的上下层边分别放在不同的槽中，所产生的磁通不会互相匝链，同时进行换向，也就不会在上下层中互相感应电势。因此，目前生产的单相串激电动机，总是采用短距元件。以附表— 3 中电动工具用交直流两用串激电动机为例，当转子槽数为 9 时，元件的实槽节距为 4 槽。当转子槽数为 11时，元件的实槽节距为 5 槽。当转子槽数为19时，元件的实槽节距为 9 槽。它们都是短节元件，都可以改善换向。

因此，采用短距元件是改善换向的方法之一。但在 4 — 3 节中我们曾经提到，元件短距以后，会减少电磁转矩。这两方面是矛盾的。我们既想改善换向，又不能使电磁转矩减少过多，这就要求我们采用短距元件，但短距得不要太大。具体的方法是：对于我们所要研究的两极电机来讲，采用奇数槽。因为两极电机采用奇数槽以后，它的极距

$$\tau=\frac{\text{奇数}}{2}=\text{某一个整数}+\frac{1}{2} \qquad 5-22$$

举一个具体例子来看，如果一个两极电机，转子采用 9 个槽，

那它的极距必为 $\tau=\frac{9}{2}=4\frac{1}{2}=4+\frac{1}{2}$。只要将这个$\frac{1}{2}$短掉

就行了，即采用 $y_1=4$ 个槽。而在图 5 —18（b）中，当转子采用偶数时，即 $Z=8$ 时，元件必须短掉一个槽，而现在转子采用奇槽以后，即 $Z=9$ 时，元件只要短掉半个槽就行了。

这样既采用了短距元件，可以改善换向，但短距得又不太多，不会过分地减少电磁转矩。从附表一3中可以看出，74年设计的新系列电动工具用交直流两用串激电动机，转子都是奇数槽，例如Z＝9、11、19。当然短距太多以后，还会产生其它不良后果，此地就不再分析了。

5—4 火花的成因

所有换向器电机，当然也包括串激电动机在内，换向的实际情况远不是象5—2节中所讲的那样简单，而是一个复杂的过程。在5—2节中，我们只是着重从电磁方面讨论了换向的基本过程及产生火花的初步原因。实际上影响换向和产生火花的因素除了电磁方面的原因外，还要受机械、化学、电刷材料、工作环境等因素的影响。这些因素简单介绍于下。

一、换向火花

在5—2节讨论换向的基本过程时，我们曾经提到，换向过程有三种类型，即：直线换向、延迟换向和提前换向。直线换向时，流经换向器片1与换向器片2的电流与它们的接触面积成正比例，当换向过程快结束时，电刷即将与换向器片1脱离〔图5—1(b)〕，S_1接近于零，i_1也接近于零，换向过程顺利完成，故不会发生火花。在延迟换向时，由于电抗电势力图阻止换向元件中电流的变化，因此，换向元件中的电流总是力图保持原来的方向，从换向器片1流到电刷，而不能顺利地转换到从换向器片2流到电刷，当换向过程快结束时，电刷即将与换向器片1分离，S_1已接近于零，如果i_1还不能为零，i_1被强迫拉断，这样在后刷边出现火花。至于

提前换向，略为具有一点提前换向，这是我们所欢迎的，有利于突然过载时消灭火花（分析略），但提前换向过分激烈时，使电流过早的转变到由换向器片 2 流到电刷，导致前刷边电流密度过大，尤其在换向刚开始时，前刷边只有少数几点与换向器片 2 相接触，过大的电流由此通过，会使该处电刷过热并发生火花。这些由于换向过程不良而产生的火花通称为换向火花。5—3 节中所提到的改善换向的方法，主要是改善换向过程消除这种换向火花。

二、电位差火花

电位差火花可以通过图 5—20 来解释。图 5—20 是转子绕组的简化图形，它与图 1—3 类似。在图 5—20中，电刷 A、B 上方 6 个元件组成一条支路，电刷 A、B 下方 6 个元件组成了另一条支路，这两条支路通过电刷 A、B 并联起来。当电压施加到电刷 A、B 上以后，每条支路所承受的电压都是 U。如果电压U 均匀分布在每个元件上，则每个元件上的电压便相等。由图 5—20 可以看出，每个元件上的电压就是两个换向器片之间的电位差，因此当电压均匀分布在元件上时，每两个换向器片之间的电压便相等，称为片间平均电压 U_P。下面我们看 U_P 的计算方法。由于元件数就等于换向器片 K，因此每条支路有$\frac{K}{2}$个元件，电压 U均匀分布在

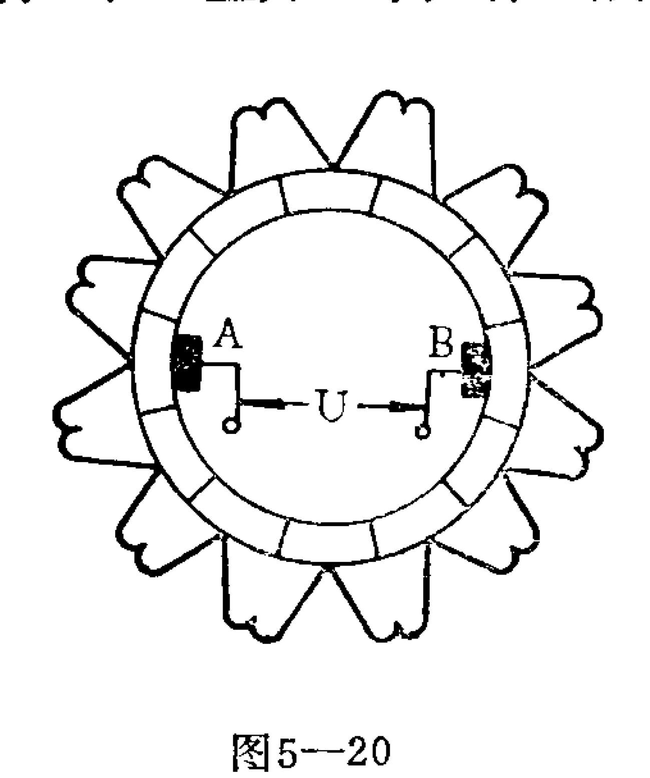


图5—20

这$\frac{K}{2}$个元件上，则每个元件上的电压，即片间平均电压为

$$U_p=\frac{U}{\frac{K}{2}}=\frac{2U}{K} \qquad 5-23$$

实际上，电压U并不是均匀分布在每个元件上的，而是有的元件承受电压高，有的元件承受电压低（分析略）。元件承受电压高的，它所对应的换向器片间电压就高，元件电压低的，它所对应的换向器片间电压就低，所以沿着换向器圆周，片间电压分布并不均匀，最大片间电压约为平均片间电压的2—2.3倍。当片间电压超过一定数值时，两个换向器片之间就会发生火花，这种火花，就称为电位差火花。在电机运转过程中，由于电刷与换向器相摩擦，总会有些铜屑碳末存留在两个换向器片之间的槽中，这些铜屑碳末，会助长电位差火花的形成。火花会导致周围空气的游离，空气的游离又反过来促进火花的增长，严重时便使电机损坏。

既然电位差火花是由于片间电压过高而引起的，所以消除电位差火花最有效的方法是限制片间电压的数值。从式5—23可以看出，片间平均电压U_p是反比于换向器片数K的，要使片间平均电压U_p不要太高，则换向器片数K一定不能太少，这也是在设计串激电动机时，选取换向器片数K的重要依据之一。当电机额定电压$u_N=220$伏时，一般串激电动机平均片间电压约为$U_p=8—22$伏。电动工具用串激电动机平均片间电压为$U_p=10—16$伏，

低压电机的换向器片数K较少，如果将一台低压电机改绕成高压电机使用，它的片间电压是否过高是必须校验的一

个数值。

三、环火

当电机剧烈改变负荷时，电枢电流突然猛增，可能会出现环火。所谓环火，就是沿着换向器圆周在两个电刷之间，为电弧所短路。在某些情况下，这样强烈的电弧也可能发生在电刷与机壳之间。环火是一种严重的故障，往往使电机遭受很大的破坏。环火形成的因素是复杂的，简单介绍如下：当电机受到冲击负荷时，电枢电流急剧上升，换向元件中电抗电势过大，使得换向过分延迟，在后刷边产生强烈火花。随着换向器转动，强烈的火花形成电弧被机械的拉长，沿着换向器转动方向前进。这种电弧可能会与电位差火花汇合在一起，连成一片，导致两个电刷之间有很长的电弧连通，使整个换向器圆周上发生环火。因此，我们希望在正常负载时，使换向略为提前，这样在电流急剧增长时，换向不致于过分的延迟，这有利消除环火。

四、机械性火花

电刷下面火花的形成除了上述电磁上的因素外，还有机械上的因素。由于运行情况复杂，这两类火花可能同时存在，并互相影响，因而判断火花的原因是比较复杂的。由机械原因引起的火花，它的大小与电流关系不大，而与电刷的压力关系较大，增加电刷压力时，火花可能减弱或消失。由电磁因素引起的火花与负荷大小有关，电流大，火花大，电流小，火花也变小，增加电刷压力，火花反而增大。一般来讲机械性火花的成因，大致有下面几个方面：

1.换向器偏心或换向器不圆

由于换向器的偏心或不圆，当换向器旋转时，电刷便会

产生剧烈的跳动，电刷与换向器之间时而接触，时而断开，使得电流时通时断，因而产生火花。这种由于换向器偏心或不圆造成的机械性火花，对小容量串激电动机的危害性比其它电机更为严重。因为容量略为大一点的换向器电机，一个刷杆上往往装有好几个电刷。电刷跳动时，某一个电刷断开，但其它电刷可能还接触着，电流不会时断时通，因而不易产生火花。但小容量串激电动机一边只有一个电刷，电刷一跳开，电流立即拉断，因而容易出现火花。所以对小容量串激电动机换向器的同心度及椭圆度的要求，比其它换向器电机应高一些。

2.电刷与换向器接触不良

一般情况下，并不是电刷的全部表面都能与换向器接触，接触面积能达到电刷表面的75%，已较满意。尤其是小容量串激电动机为了改善换向，往往采用硬质电刷，就更难使接触面积达到理想的程度。电刷与换向器接触不良，有效面积减少，电流密度就会增加，会使电刷局部过热。而且电刷调整到某一位置时，火花最小，如果电刷的接触面积偏向一侧，使得电刷的实际位置偏离了预定位置，换向情况恶化，也会出现火花。

3.换向器片有毛刺、换向器表面有铜屑碳末

换向器片上的毛刺会使电刷表面划出一道道的小沟，较大的毛刺会使电刷产生跳动，因而出现火花。

电机长期运行，由于电刷与换向器相摩擦，两个换向器片之间的小沟里，会存留一些铜屑碳末，使片间形成通路，也会产生火花。

4.电刷与刷盒配合不好

旋转过程中换向器总会产生一些振动，我们希望在弹簧的压力下，电刷能随换向器一起跳动，随时都保持密切接触而不要断开，这就要求电刷能在刷盒内上下自由移动。如果刷盒内有尖角或凸起部分，或者电刷与刷盒之间的间隙过大过小等，都会使电刷不能在刷盒内上下自由移动，当换向器有点跳动时，电刷不能随同换向器一起跳动，使电路时断时通，因而出现火花。

此外，刷盒与换向器之间还应保持适当距离。距离太大，会妨碍电刷在刷盒内自由上下移动而出现火花，同时电刷下端容易碎裂。如果距离太小，由于换向器的跳动，两者可能会发生碰撞。

5.弹簧压力

电刷上的弹簧压力一定要适当。弹簧压力过小，电刷与换向器之间的接触便不稳定，电流时断时通，因而出现火花。弹簧压力过大，会增加电刷与换向器的磨损，破坏换向器表面上的一层氧化膜。而换向器表面上的这层氧化膜，是良好换向必不可少的，氧化膜的破坏，会使换向恶化，也会出现火花。所以为了保证良好换向，消灭火花，弹簧压力一定要适当。压力究竟多大为合适，视电刷牌号而异。一般来讲，硬质电刷压力大。电动工具用的串激电动机，它的电刷压力约保持在300—500克/厘米^{2}之间。

6.电机振动

单相串激电动机转速较高，如果转子平衡得不好，运转时会产生剧烈的振动。转子振动时，会使电刷在换向器上跳动，因而形成火花。一般的串激电动机在转子修复后，应进行静平衡，而高速电机的转子，则必须进行动平衡。

火花产生的机械因素，还可以列举出一些，例如换向器片或云母片突出，刷盒未固定好，等等。

五、化学因素对换向与火花的影响

为了解决换向与火花的问题，有不少人对电刷与换向器表面的接触性质进行了深入的研究。研究的结果表明，要获得良好的换向，在换向器的表面需要形成一层薄膜，这层薄膜由下面几部分所组成：由于氧化作用，形成了一层氧化亚铜薄膜，上面再覆盖着一层石墨薄膜，在薄膜的表面还吸附着一层潮气，同时，由于电刷和换向器片之间实际上是点接触，在没有接触着的空间充满了碳的微粒。这种状态对换向的进行及换向器电刷的磨损都是有利的。由于氧化亚铜薄膜的存在，使换向回路中具有足够大的接触电阻，有利于换向过程的进行，因而火花较小。电刷的摩擦可能使这层氧化膜破坏，但当电流流过时，由于滑动接触面的温度高，接触层中有氧气和潮气，所以新的氧化膜又不断形成，这样换向过程就能够顺利进行。电刷与换向器之间形成的微小电弧是电刷磨损的原因之一，换向正常，火花较小，电刷也就不易磨损。同时，覆盖在氧化亚铜薄膜上的石墨及碳微粒，吸取水分后，形成一层润滑薄膜，减轻了电刷与换向器的磨损。如果水分不足，石墨碳微粒不可能在换向器表面稳定下来，形成不了润滑薄膜，这就会增加摩擦，从而引起电刷与换向器的磨损。从上面的分析可以清楚地看到，空气中必须要有足够的氧气和适当的湿度，才能形成氧化亚铜薄膜及石墨和碳的润滑薄膜，以保证换向过程的顺利进行，防止电刷和换向器的磨损过快。所以单相串激电动机从来都不做成封闭式的，因为空气中的氧气和潮气无法进入封闭式电机的内部，这就妨

碍了薄膜的形成，运行时不仅火花较大，而且电刷和换向器将很快磨坏。

六、故障性火花

如果电机出了故障，例如定、转子绕组短路、断路、接地、接反等，运行时，也会使电机出现火花，这种火花，我们称为故障性火花。有关电机的故障问题，我们在第七章再进行分析。

通过上述的分析我们可以看出，换向是一个复杂的过程，影响换向的因素和产生火花的原因包括电磁、机械、化学、工作环境、电刷材料等多方面，这些因素对换向过程的影响又彼此联系着，对换向过程各种现象的实质，至今还没有完全掌握，有待进一步研究。

这里必须指出，火花是判断换向好坏的重要标准，但不是唯一标准，还应注意换向器和电刷的磨损情况。实践说明，有些电机虽在无火花条件下运行，但换向器表面形成高低不平的条痕和凹沟，发生严重损伤。有些电机虽有火花，但换向器表面能够形成均匀而光泽的薄膜层，电刷的寿命和换向器的磨损都正常，所以在某些场合下，一定的火花对电机的运行还是有利的。

5—5　交流串激电动机换向过程的特点

在前面几节中我们以直流串激电机为例，研究了换向过程的基本特点，这些内容是所有换向器式电机的共同问题，所得到的结论当然也适用于交流串激电动机。下面我们进一步研究交流串激电动机换向过程的特点。

交流串激电动机换向的特点可以通过图5—21来说明。

图 5 —21是图 4 — 6 简化以后的图形，只画出了其中一个N极及N极下正在进行换向的一个元件，而将其他部分全部删去。图 5 —21清楚地告诉我们，正在进行换向的元件是包围着整个N极磁通的，或者说与整个N极磁通相匝链。由于现在研究的是交流串激电动机，N极磁通是随时间而变化的，当N极磁通交变时，便在换向元件中感应电势，称为换向元件中的变压器电势。由于换向元件被电刷所短路，变压器电势便在换向元件中产生很大的环流。这个环流的数量是很可观的。如果把换向元件中的三个电势——即：电抗电势、电枢反应电势及变压器电势加在一起，这三个电势共同在换向元件中所产生的环流，其数量能达到这个元件中正常工作时电流的许多倍。这样大的环流当然要使电刷下面出现火花。为了消除火花，必须限制换向元件中的环流，限制环流的方法一般有两种，一是增加换向元件回路中的电阻。在小容量串激电动机中，增加换向元件回路电阻最常用的方法，就是采用硬质电刷。由于硬质电刷具有较大的接触电阻，这就使得被电刷所短路的换向元件回路中的总电阻显著增加，因而限制了环流。但采用硬质电刷会带来下面三个缺点：（ 1 ）硬质电刷所能允许的电流密度较小，在流过一定电流的条件下，必须增加电刷及换向器的尺寸。（ 2 ）电刷尺寸增大后，电刷在换向器上的总压力也增大了，使得总的机械损耗增加。（ 3 ）硬

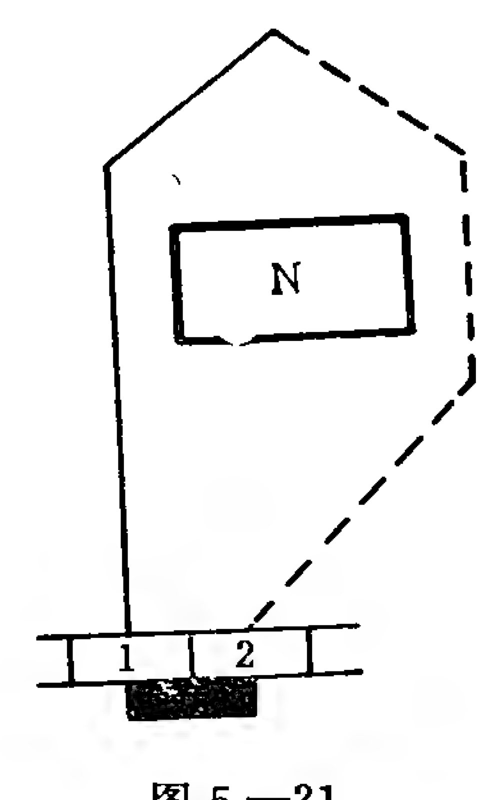


图 5 —21

质电刷的接触压降ΔU较大，因而流过一定电流I时，接触损耗ΔUI也较大。

限制环流的第二个办法就是设法消除这三个妨碍元件换向的电势，消除的方法分述如下：

一、电抗电势

消除电抗电势的方法在5—3节中已详细分析过，这里再简单回顾归纳一下。

从式5—19可以看出，电抗电势有两个基本特点：（1）电抗电势的大小正比于电流，（2）电抗电势的大小还正比于转速。这是因为，从图5—1的分析可以看出，转速越高，换向过程越快，即换向周期T越短，所以电抗电势就越大（式5—19）。同电抗电势一样，换向元件切割换向极磁通而产生的速度电势也具有同样的两个特点，即：（1）速度电势也正比于电流，这是因为换向极是与电枢绕组相串联的，电流越大，换向极的磁通越强，当然由于切割换向极磁通而产生的速度电势也越大。（2）速度电势也正比于转速，这是因为速度电势是由于元件旋转以后切割换向极磁通而产生的，转速越高，切割的速度越快，当然感应的电势便越大。既然电抗电势及速度电势都正比于电流和转速，因此，它们在任何电流及转速下都能互相抵消，所以要消除电抗电势的不利影响还是比较容易的。

在串激电动机中，由于移动电刷或移动元件到换向器片上的焊头位置，其效果同装置换向极一样，由此而产生的速度电势也是正比于电流及转速的，也能保证在任何电流及转速下，速度电势与电抗电势相抵消，而使换向过程改善。

二、电枢反应电势

同电抗电势一样，电枢反应电势也具有同样的两个特点，即：（1）电枢反应电势正比于电流。这是因为，电流越大，电枢磁通越强，当然切割电枢磁通而产生的电枢反应电势也越大。（2）电枢反应电势还正比于转速。这是因为，转速越高，换向元件切割电枢磁通越快，当然感应的电枢反应电势也越大。既然电枢反应电势同电抗电势具有同样的性质，也正比于电流及转速，因此可以采用消灭电抗电势同样的方法来消灭电枢反应电势。

三、变压器电势

在交流串激电动机中，影响换向过程最严重的因素是变压器电势。这是因为：不论是装置换向极，或者是移动电刷，或者是移动元件到换向器片上的焊头位置，这三种措施都无法保证在任何电流及转速下，将变压器电势抵消掉。与电流的关系牵涉到相位问题，比较难于讲解，此地从略，我们只简单提一下转速的问题。

换向元件中的变压器电势是由于主磁通的交变而引起的，磁通交变得快，变压器电势就大，磁通交变得慢，变压器电势就小，因此变压器电势的大小完全是由磁通交变的速率——即电源频率来决定的，而与转速无关。即使转速等于零，换向元件中也存在着变压器电势。如果我们装置了一个换向极，一定要在转子旋转以后，换向元件才能切割换向极磁通，而在其中产生速度电势。在刚起动时，转速等于零，换向元件尚未切割换向极磁通，其中尚无速度电势，但此时变压器电势已经存在了，这个变压器电势便在换向元件中产生很大的环流。起动时如此，在其它转速下，情况也基本类似。这是因为变压器电势与转速无关，而速度电势正比于转

速，当转速变化时，变压器电势大小不变，而速度电势的大小却随转速在变化，这当然不可能使任何转速下两种电势都能互相抵消掉。由于没有一种较好的方法能够保证在任何电流及转速下将换向元件中的变压器电势抵消掉，所以在设计串激电动机时，限制变压器电势的大小，是保证换向过程良好进行的关键问题。根据现在的生产水平，变压器电势应不超过 6 — 8 伏。下面我们分析限制变压器电势的措施。

根据电磁感应定律，线圈中感应电势的大小正比于它的匝数和它所匝链的磁通。匝数和磁通越多，感应电势就越大。根据这个道理，要限制变压器电势的大小，只有从磁通和匝数上想办法。磁通和转矩是正比关系（式 3 —11），因此磁通是不能减少的，磁通减少了，转矩也就减少，电机出力下降，材料不能充分利用。所以限制变压器电势大小的最主要办法是限制每个元件的匝数。电机尺寸大，每极磁通就多，每个元件匝数应该少些。电机尺寸小，每极磁通就少，每个元件匝数就可多些。附表一 3 所列出的数据就表明了这个规律。定子冲片外径为56毫米的电机，转子每个元件匝数最多可以是36匝，而定子冲片外径为90毫米的电机，转子每个元件匝数最少的只有 8 匝了。考虑转子每个元件匝数多少的一个主要因素之一，就是要限制变压器电势，使其不要超过 6 — 8 伏。

式 4 —25告诉我们，每个元件匝数的计算公式为

$$Wy = \frac{N}{2K} \qquad 5-24$$

式中：N ——转子绕组总导体数，K——换向器片数。从式 4 — 9 及式 4 —21等可以看出，在转速n、功率因数cosφ、效

率 η 等既定的情况下，N 就大体定下来了。从式 5－24 又可以看出，在N既定的情况下，为了限制变压器电势，Wy 有一定的数值范围，这样换向器片数 K 的数值也就大体定下来了，这是在设计交流串激电动机时，决定换向器片 K 的重要依据之一。

第六章　串激电动机结构介绍

和其他电机一样，串激电动机也可分为定子和转子两大部分。定子的作用在电磁方面，主要是产生磁通，在机械方面是整个电机的支撑，它由主磁极、端盖和电刷等所组成。转子的作用是产生电磁转矩，从而把电能转变为机械能，它由电枢铁心、电枢绕组、换向器等所组成。下面对它们的特点逐一介绍。

6—1　定　　子

一、定子冲片的材料

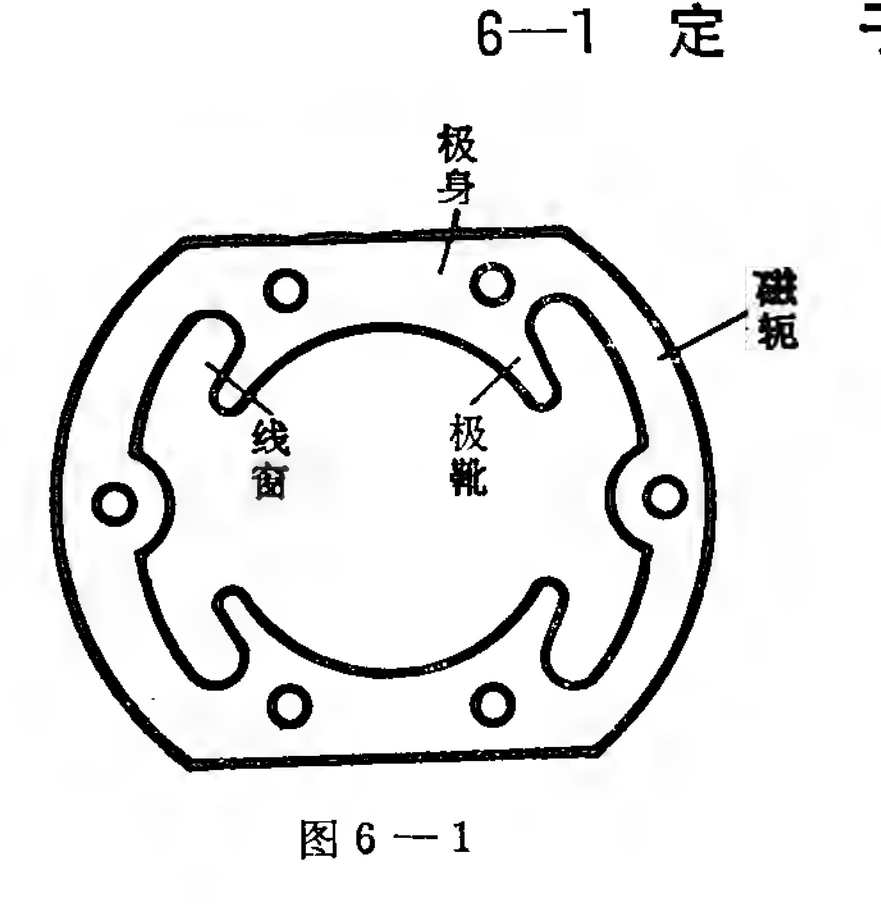


图 6 — 1

图 6 — 1 是交流串激电动机定子冲片的典型形状，由于在交流串激电动机中，定子磁通是交变的，会产生铁心损耗，因而定子冲片都是采用硅钢片冲制而成。

二、定子冲片外圆尺寸的决定

各种类型电机，考虑定子冲片外圆尺寸的重要原则之一，就是硅钢片的经济剪裁，也就是在冲制定子冲片时余留

下来的边角料最少，硅钢片的利用率最高，因此定子冲片的外径不能任意决定。目前所用定子冲片的外径为 φ138、φ120、φ102、φ90、φ80、φ71、φ62、φ56、φ50、φ45、φ36共11种。新系列电动工具用交、直两用串激电动机则采用其中的 φ90、φ71、φ56三种。采用标准冲片后，不仅是硅钢片的利用率较高，而且可以使零部件及工模具的通用性较强，起到制造方便和降低成本的作用。

三、定子内径（也就是转子外径）的决定

电机设计知识告诉我们，在其他条件不变的情况下，电机的功率正比于转子外径的平方，而与定子外径无关，因此在定子外径一定的情况下，我们总希望采用较大的转子外径，这样可以产生较大的功率。但在定子外径一定的情况下，增加转子直径，会使定子的线窗面积减少（图 6 — 1），而使定子绕组没有足够的位置安放。因而，在定子外径一定的情况下，转子的直径也不能任意决定。目前的产品定、转子外径之比约在1.75—1.85之间。

随着机械化程度的提高，已出现将线圈直接绕在定子铁心上的电机，这样定子绕组端部较短，定子铜耗也因此可以减少，有利于提高电机的出力。

四、极靴弧长b的决定

极靴弧长 b（见图 6 — 2）也是定子冲片一个极为重要的数据。如果 b 取大，磁极面积就大，就能产生更多的磁通，使转子产生较大的转矩，因而能带动更大的负载。但极靴弧长增大以后会带来下面两个缺点：

1. 定子产生的磁通有两类，即主磁通和漏磁通（图 6 — 3）。所谓主磁通是指穿过空气隙进入转子的那一部分磁

通。转子电流与主磁通相作用才能产生转矩，因此，要实现电磁——机械能量的转换，主磁通的存在是必不可少的。由于主磁通必须穿过空气隙，因此，有时也称为气隙磁通。所谓定子漏磁通是指单独链定子绕组而不进入转子的那一部分磁通，例如在图6—3中，由一个极尖流到另一个极尖的磁通，就称为极尖漏磁通。由于漏磁通不穿过转子，不可能与转子电流相作用而产生转矩，因此，它的存在是不必要的。对串激电动机来讲，我们总希望漏磁通越小越好。那漏磁通的大小又由什么因素来决定呢？由于空气的磁阻比铁的磁阻大的多，因此对极尖漏磁来说，它的磁阻主要由两个相邻磁极极尖的距离来决定（图6—3）。如果极靴弧长增大，两个相邻磁极的极尖距离就缩短，极尖漏磁通的磁阻就变小，极尖漏磁通就增大。因此，从减少漏磁通的角度来看，我们不希望极靴弧长太大。

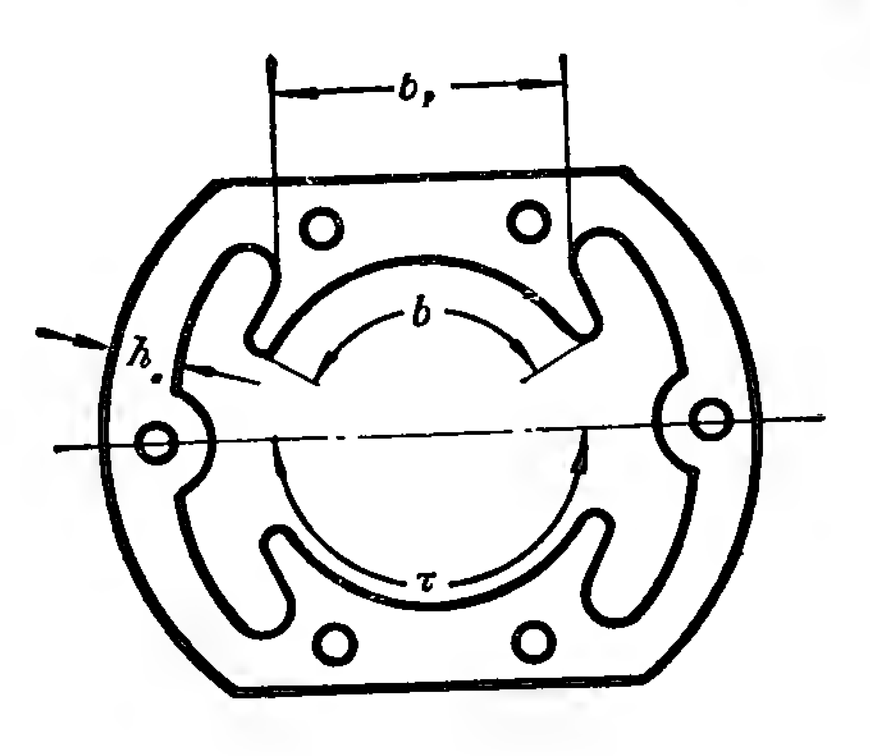


图6—2

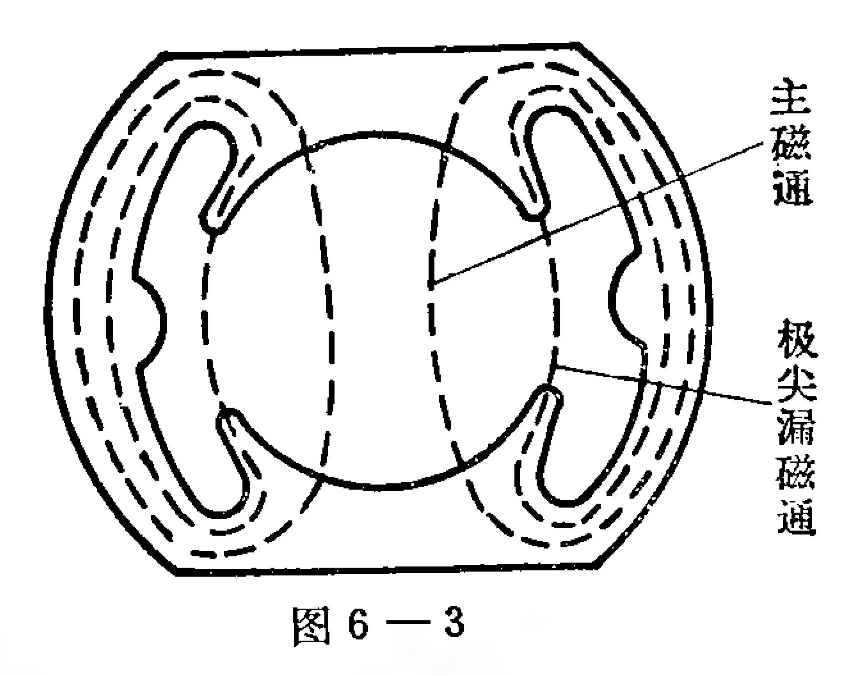


图6—3

2. 极靴弧长太大，还会使换向恶化，火花增加，原因如下。

在解释图 5 — 6 时，我们就曾经提到过，转子流过电流以后，要产生转子磁通，转子磁通的方向总是与换向极磁通方向相反，既然换向元件切割换向极磁通所产生的电势，能够帮助换向；那么，换向元件切割转子磁通所产生的电势，一定会妨碍换向，这个妨碍换向的电势就称为电枢反应电势。显然，电枢反应电势的大小与转子磁通成正比关系。那转子磁通的大小又由什么因素来决定呢？我们可以通过图 6 — 4 来分析。在图 6 — 4 中，虚线表示了转子磁通的路径，它告诉我们转子磁通的路径由三部分所组成，即：(1)定子极靴，(2)转子铁心，(3)极靴以外的气隙部分。由于空气的磁阻远大于铁心的磁阻，因此转子磁通的大小主要由这一部分气隙长度所决定。如果极靴弧长取得太大，则极靴以外的这一部分气隙长度就短，转子磁通所遇到的磁阻小，转子磁通就大，换向元件切割转子磁通所产生的电枢反应电势也大，换向情况恶化，容易出现火花。所以从改善换向的角度来看，我们不希望定子弧长 b 取得太大。

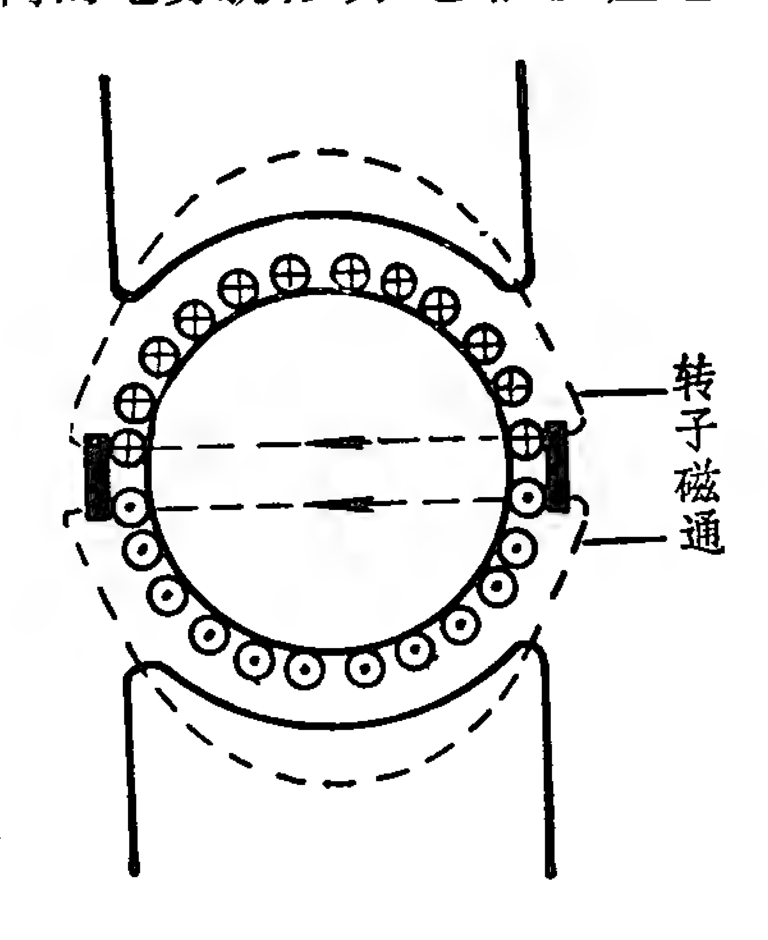


图 6 — 4

从上面的分析可以看出，极靴弧长过大过小都是不利的。在 4 — 1 节中，我们曾经令 τ 表示两个磁极中心线之间

的距离（图4—3），实际上也就是一个磁极所跨过的距离（图6—2），极靴弧长为

$$b = \alpha \cdot \tau \qquad 6-1$$

$\alpha = \frac{b}{\tau}$称为极弧系数，一般取$\alpha = 0.67$左右。

五、定子轭高h_C及磁极宽度b_P的决定

从图6—2可以清楚地看到，决定一张定子冲片的主要尺寸是：定子外径、定子内径、极靴弧长b、定子轭高h_C及磁极宽度b_P。前面三个尺寸决定的原则，上面已经分析过了，至于下面两个尺寸决定原则主要是考虑磁通密度不要太高，新系列电动工具用交直流两用串激电动机的磁密范围一般是：

定子磁极磁密$B_P = 6500 \sim 8500$高斯，

定子轭磁密　$B_C = 16000 \sim 18000$高斯。

6—2　转　　子

一、转子槽数的选取

转子槽数的多少对电机的性能、价格、制造工艺都有很大的影响，因而它的选取也不是任意的。下面我们首先看转子采用较多槽数的优点。

1. 采用较多的槽数，能使导线在电枢圆周上分布得比较均匀，因而转子在不同转角位置上的起动转矩也就比较均匀。这个道理可以通过图6—5来解释。由于导线是放在槽中的，图中的6根导线就表示转子上有6个槽。转子上的载流导体与定子磁通相作用才能产生转矩，当转子处于图6—5（a)所表示的位置时，只有两根导体位于定子磁极之下，

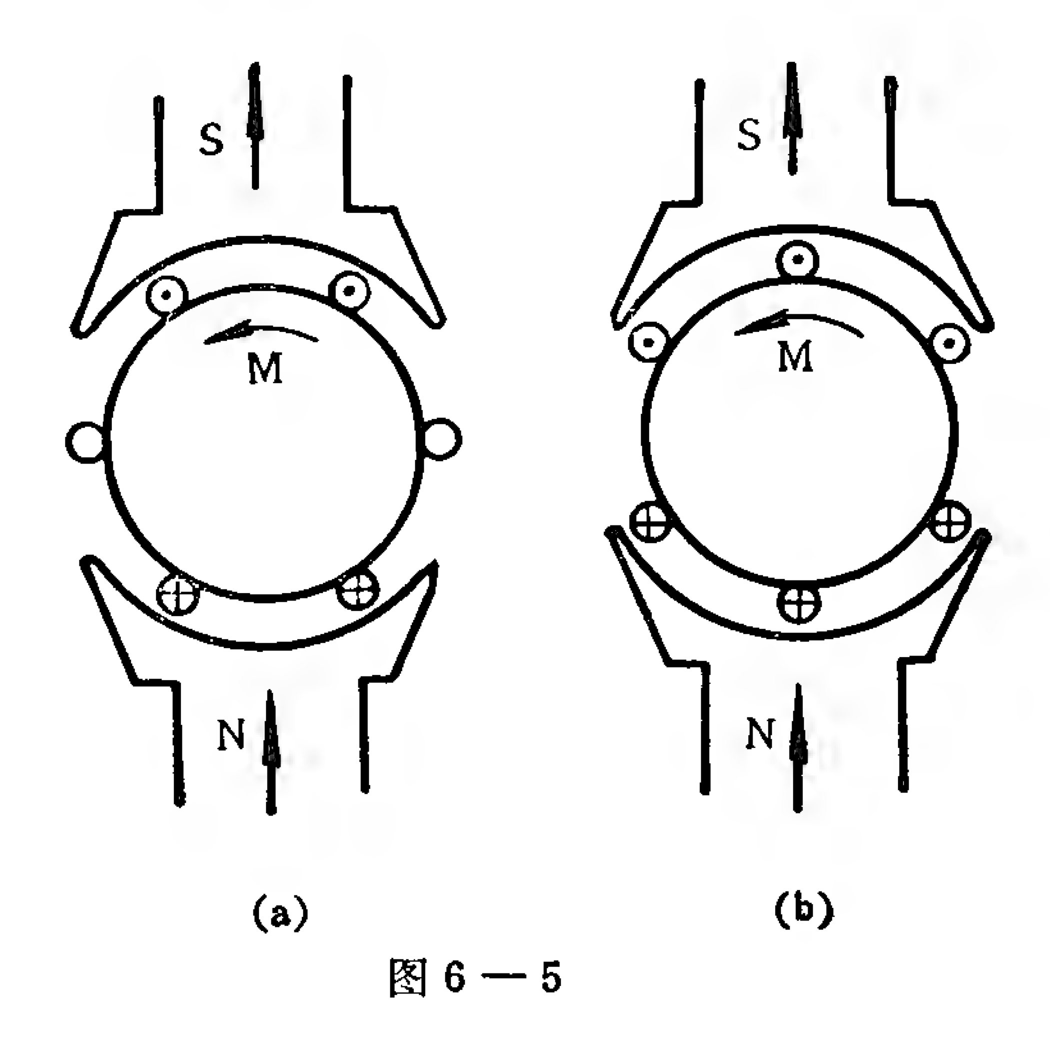


图 6 — 5

产生的转矩就比较小。而当转子处于图 6 — 5 (b) 所表示的位置时，有三根导体位于定子磁极之下，产生的转矩就比较大。因而转子在不同转角位置上的起动转矩是不一样的。这种差别随着槽数的增加而减少，因为槽数增加以后，在转子圆周上导体分布就比较均匀了，不同的转角位置，处于磁极下的导体数差别不大，因而起动转矩也就差别不大了。这是转子槽数对起动转矩的影响。下面再看转动以后的情况。电机转动以后，转子交替地处于图 6 — 5 (a)和 (b) 的位置，电磁转矩一会大、一会小，使得转矩是脉动的，这就会引起电机的振动和产生噪音。从这个角度上来看，我们也是希望采用较多的槽数。

2. 电机的总导体数是不变的，槽数增多以后，分配到每个槽中的导体就少了，每根导体通过电流以后都要产生损耗

而发热，每槽导体少了，每槽发热量就少，槽中热量容易散发出去，转子的温升可以降低。

3.采用较多槽数以后，每个槽中的并列元件数就少，从5—3节的分析可知，这可减少互感电势的影响，对换向是有利的。

下面我们分析采用较多槽数的缺点。

1.每个转子槽中都要垫一层绝缘材料，转子槽数增多后，绝缘材料的用量增加。

2.绝缘材料的用量多，绝缘材料所占用的空间面积也就多，导线能占用的面积就减少，使铁心的利用率降低。

3.转子冲片是用冲模冲制出来的，转子槽数增多，冲模的制造困难，而且转子绕组的元件数也多，下线的工时增加。

从上面的分析我们可以看出，转子槽数过多过少都是不利的。目前生产的串激电动机，转子槽数在8～19槽范围内选取，小容量取低值。

通过5—3节的分析我们可以知道，当每一对极下的转子槽数为奇数时，可以减少因上、下层导体同时换向而产生的互感电势，使电机的换向情况改善，火花较小，而同时电磁转矩又减少不多，因此串激电动机不少是采用奇数槽的。例如附表—3中电动工具用交直流两用串激电动机就选用9、11、19三种槽数，它们都是奇数。但是，为了便于机械化自动下线，以提高工效，近年来又倾向于将转子槽数改为偶数。

二、转子的槽形

图6—6是转子冲片的典型形状，转子槽形有两个特

点：（1）槽口似闭非闭，只是为了下线留下一个很小的开口，这种槽形称为半闭口槽。（2）槽形上宽下窄，这种槽形又称为梨形槽。串激电动机毫无例外的采用半闭口的梨形槽。理由如下：

1. 采用半闭口槽的目的主要是为了减少空气隙的磁阻，使定子能产生更多的主磁通。这个道理可以通过图6—7来说明。我们看磁极表面的

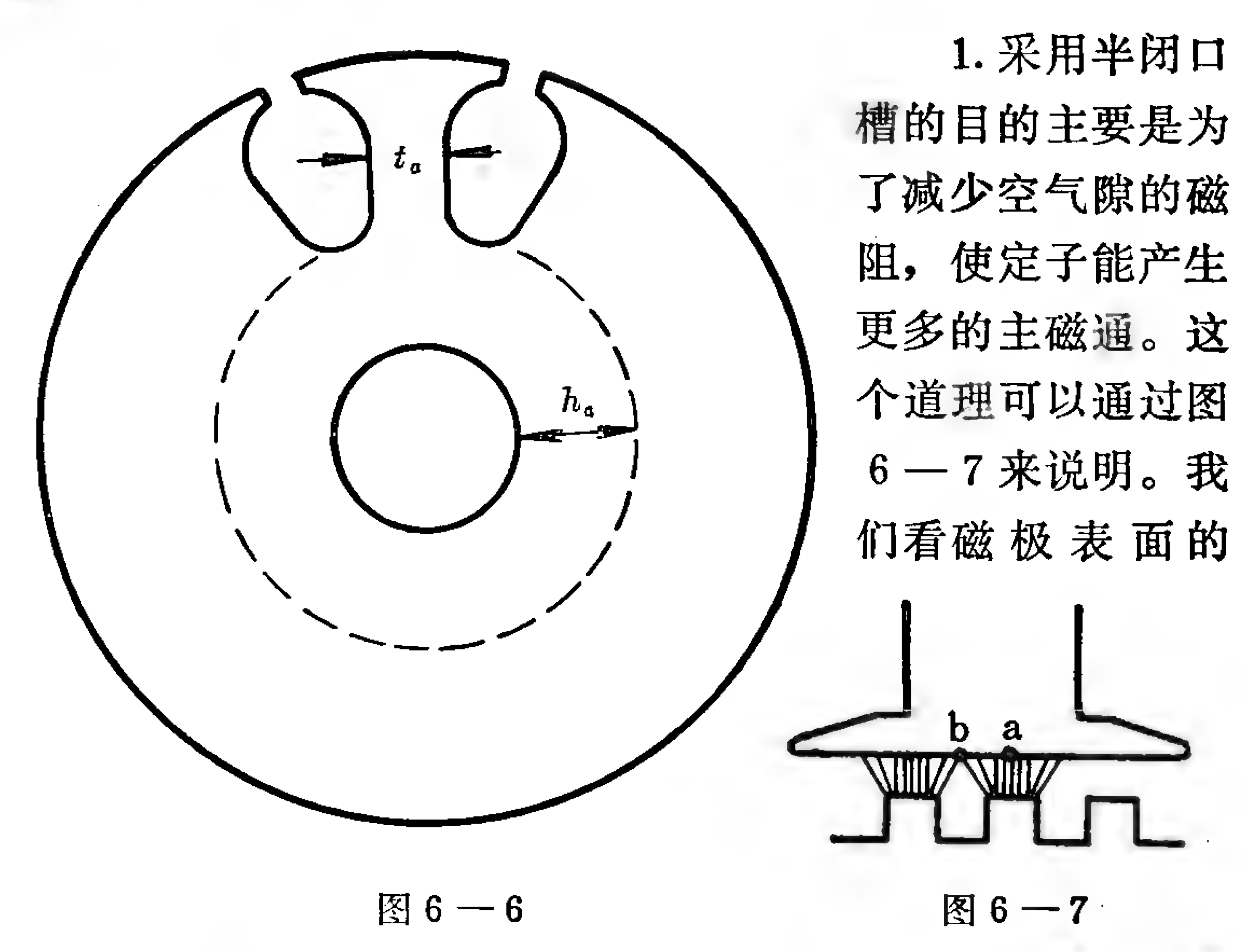


图6—6　　　　图6—7

a、b 两点。a 点正对着转子齿，磁通路径较短，磁通容易通过，因而磁通密度高。而 b 点正对着转子槽，磁通路径较长，磁通不易通过，因而磁通密度低。因此空气隙中磁通密度分布是不均匀的，对应于齿的地方，磁通多，而对应于槽的地方，磁通少。显然，槽口的存在会削弱主磁通的数量。为了减少这个影响，槽口应尽可能的小些，以使定子能产生更多的主磁通，所以采用半闭口槽。当然槽口的宽度，还与冲模制造、冲片冲制水平及下线工艺水平有关。总而言之，槽口开得大些，制造工艺方便，但电机性能就会变坏。

2. 一般情况下，电机中以转子齿部最紧张，面积最小，磁密密度最高，新系列电动工具用交直流两用串激电动机，转子齿部磁密约为17000—18000高斯。所以我们在设计电机时，总希望给转子齿部留有足够的宽度，以使磁通能够比较容易的通过，这样就必须采用平行齿。所谓平行齿就是齿的两壁平行。由于转子是圆的，一个齿和一个槽合起来的面积一定是扇形（图6—8），这样齿的两壁平行，槽的两壁一定不会平行，上宽下窄，形成所谓梨形槽。如果我们让槽的两边平行，则齿的两边一定不平行，上宽下窄，齿的根部宽度非常小，磁通不易通过，产生一定的磁通，定子上的激磁绕组就要消耗更多的磁势，对电机的性能不利。所以我们采用梨形槽，以使齿的两壁平行，让齿的上下部都有足够的面积来通过磁通。

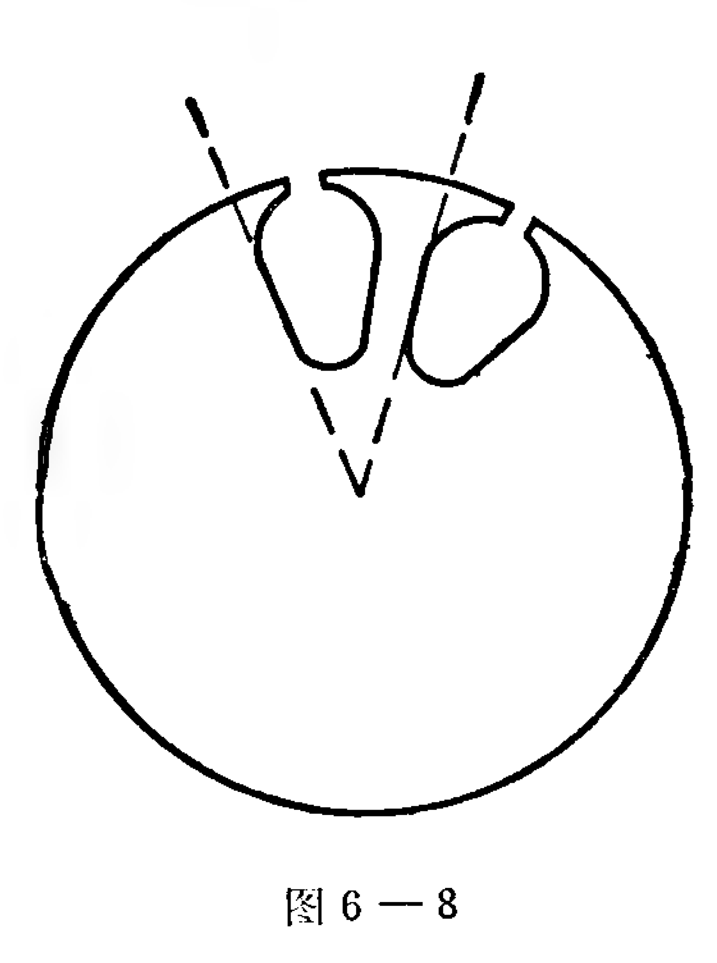


图6—8

三、转子齿宽t_a、轭高h_a及槽面积的决定（图6—6）

转子齿宽t_a、转子轭高h_a及转子槽面积这三个数值是互相影响的，从图6—6可以清楚地看到，如果使轭部尺寸h_a增大，则槽面积一定缩小。如果放大槽面积，则齿部宽度t_a一定缩小。因此这三个数值不能单独决定，要统一考虑。原则上是：转子齿部及轭部磁密不要太高，同时还要保证转子槽有足够的面积来放置绕组。新系列电动工具用交、直流两用

串激电动机，转子齿部磁密约为17000—18000高斯，转子轭部磁密在 17000 高斯以上。说明槽面积大小的是槽满率，有关槽满率的内容，已在 4 — 6 节介绍过，此地不再重复。

四、转子斜槽的目的

串激电动机的转子上，一般都是有齿有槽的，转子上齿槽的存在会使电机产生有害的附加转矩。这个理由可以通过图 6 — 9 来说明。假定转子从右向左旋转，当转子处于图 6 — 9 (a)的位置时，齿 1 与 2 正好位于定子磁极之下，定子磁通从齿 1 及齿 2 流入到转子。此时由于齿 3 离磁极较远，从定子流入到齿3的磁通很少，

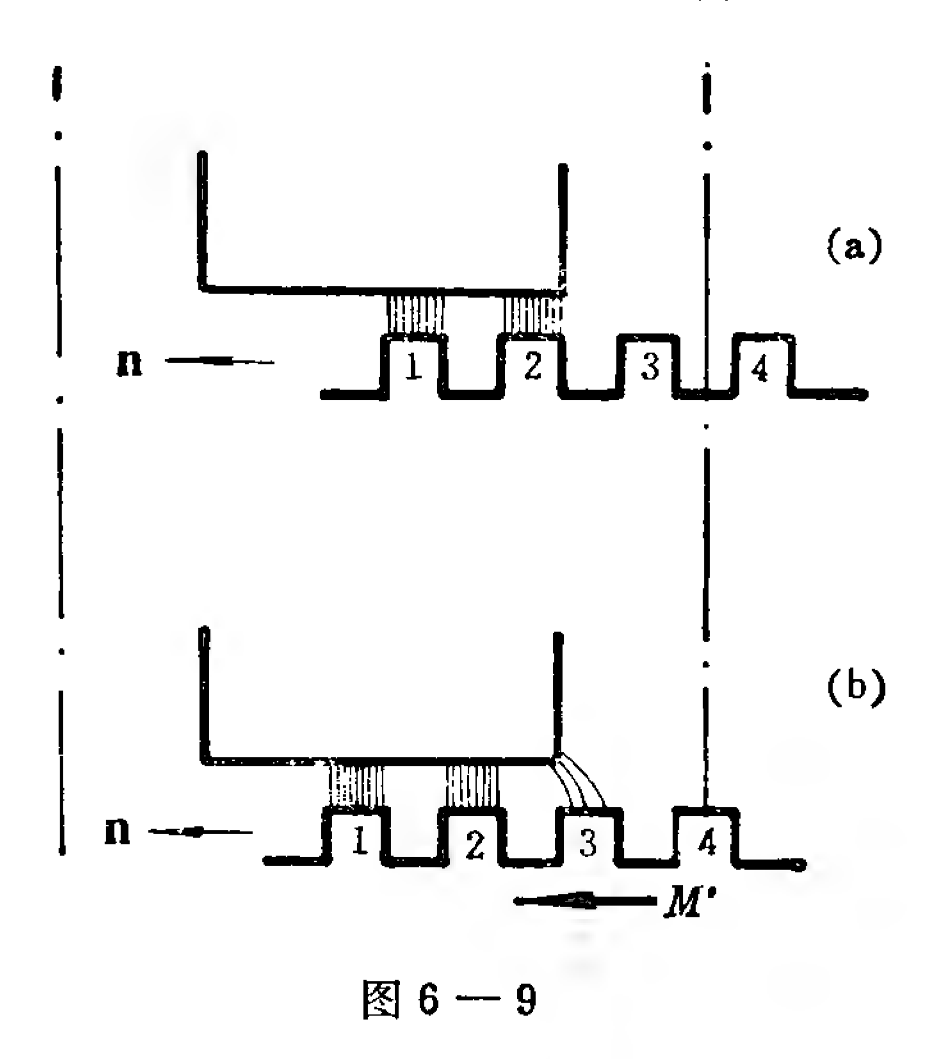


图 6 — 9

为了便于说明问题，可以暂时不考虑。当转子前进了一段距离以后〔图 6 — 9 (b)〕，齿 3 离磁极近了，定子磁通除了从齿 1 及齿 2 进入转子外，也有部分磁通流入齿 3 。由于磁力线如同橡皮筋一样，有缩短自己长度的倾向，齿 3 这一部分磁通收缩的结果，便产生了顺转向的附加转矩 M′〔图 6 — 9 (b)〕。当转子旋转时，一会处于图 6 — 9 (a) 的位置，不产生附加转矩，一会处于图 6 — 9 (b) 的位置，产生附加转矩，使得转矩忽大忽小，即转矩中出现了交变分量。这种

交变分量会使电机振动和产生噪音。转子采用斜槽的目的，就是要削弱这种由于齿槽存在而产生的附加转矩，其中的道理我们下面分析。

从图 6 — 9 的分析我们可以清楚地看出，转矩忽大忽小的根本原因，是磁极边缘的磁场变化。例如在图 6 — 9 (a) 的位置，齿 3 上没有磁通，也就不产生附加转矩，转矩就比较小。而在图 6 — 9 (b) 的位置，齿 3 上有磁通，磁力线倾向于缩短，产生了附加转矩，转矩就比较大。要使转矩比较平稳均匀，不要忽大忽小，就一定要使转子在任何转角位置上，磁极边缘的磁场都基本不变。斜槽就能达到这个目的〔图 6 —10(a)〕。在图 6 —10(a) 中，a b 及 a′b′ 分别表示了定子磁极边缘与转子两个不同的相对位置，在这两个不同的相对位置下，定子磁极边缘都对应有转子的齿和槽，因而

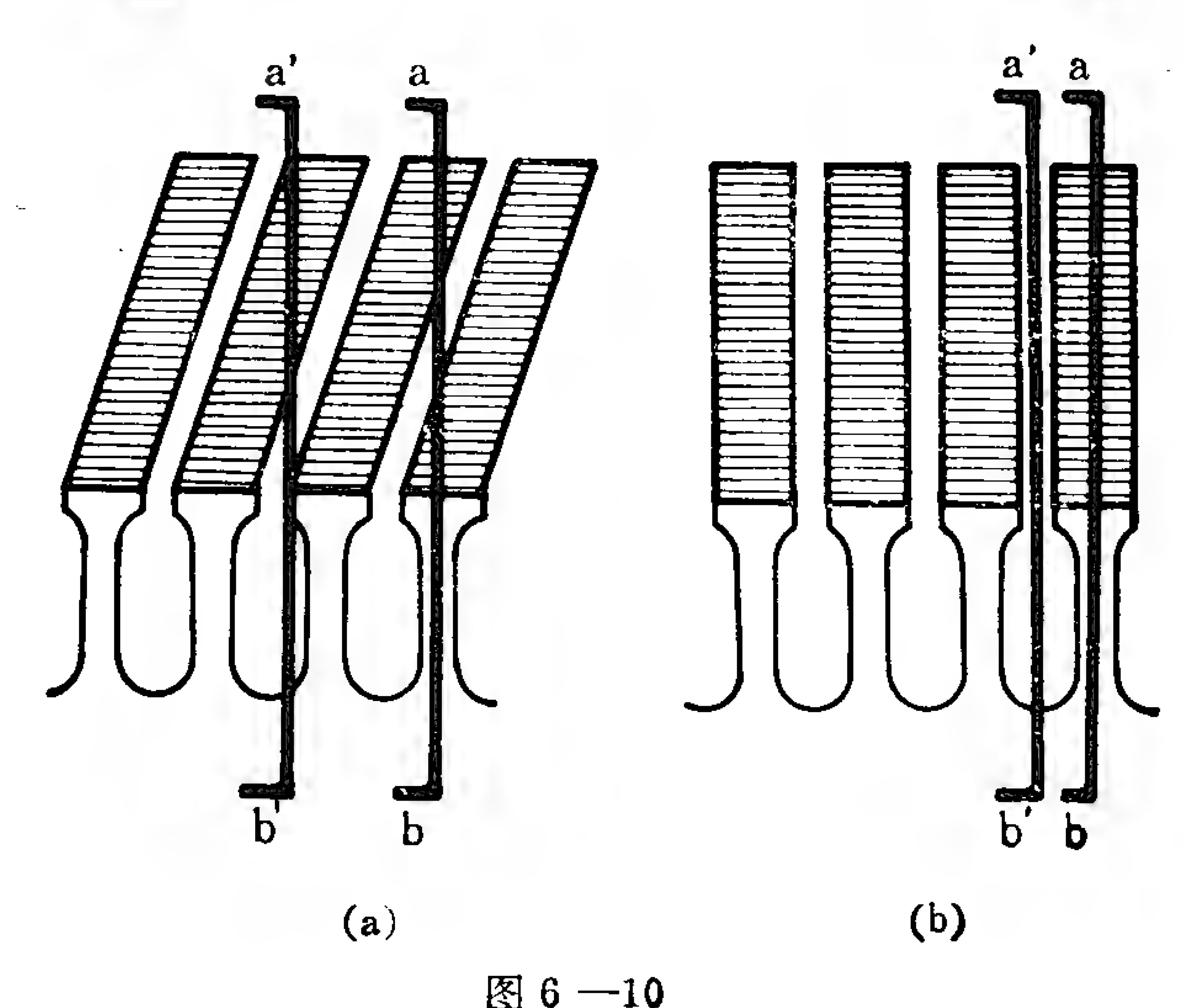


图 6 —10

磁场变化不大，转矩也就变化不大了。而在直槽时情况就不同了〔图6—10(b)〕。从图6—10(b)可以看出，当定子磁极边缘处ab直线所表示的位置时，它对应着转子齿，而当定子磁极边缘处于a′b′所表示的位置时，它对应着转子槽，这就使得在两种不同的相对位置下，磁极边缘的磁场不一样，因而附加转矩的大小也就不一样了。

6—3 空气隙

定子极靴与转子外径之间的空间称为空气隙。所有电机当然也包括串激电动机在内，空气隙的大小对电机性能会产生重大影响。对串激电动机而言，气隙长度对电机性能的影响是：

1. 增加空气隙的长度，会增加定子绕组的用铜量。因为根据电工知识我们知道，空气隙的磁阻是很大的，激磁绕组磁势的大部分消耗在空气隙中。在空气隙磁通密度不变的情况下，如果增加空气隙的长度，会显著增加定子绕组的激磁安匝，也就是要增加定子绕组的匝数，而定子线窗的面积是一定的，这就使定子绕组没有足够的位置按放，增加了工艺上的困难。而且定子绕组匝数的增加，就需要多用一部分铜线，从而增加了电机的成本。

2. 增大空气隙的长度会降低电机的功率因数。如前所述，随着空气隙长度的增大，定子匝数增加，使定子绕组的电抗x增大。从3—3节的分析可知，随着电抗x的增加，电机的功率因数下降。

3. 增大空气隙的长度，可以减少磁极的表面损耗。什么叫表面损耗？我们可以通过图6—11来解释。为了图形清

晰，我们将转子画成开口槽，当然所得的结论也是适用于半闭口槽的。从图 6—11(a) 可以清楚地看到，由于转子齿、槽的存在，定子磁极表面的磁密分布是不均匀的。我们看磁极表面的 a、b 两点，a点正对着转子齿，磁通路径较短，磁通容易通过，因而磁通密度较高。而 b 点正对着转子槽，磁通路径较长，磁通不易通过，因而磁通密度较低。转子转过一个小角度后，便得到图 6—11(b)。此时情况正好反过来，a 点正好对着转子槽，磁通密度较低，而 b 点正好对着转子齿，磁通密度较高。当转子旋转时，a、b两点一会对着转子齿，磁通密度高，一会又对着转子槽，磁通密度低。也就是说，当转子旋转时，由于槽和齿的影响，磁极表面任何一点的磁密都是不断变化的，这就会引起一些铁耗，这个铁耗就称为表面损耗。

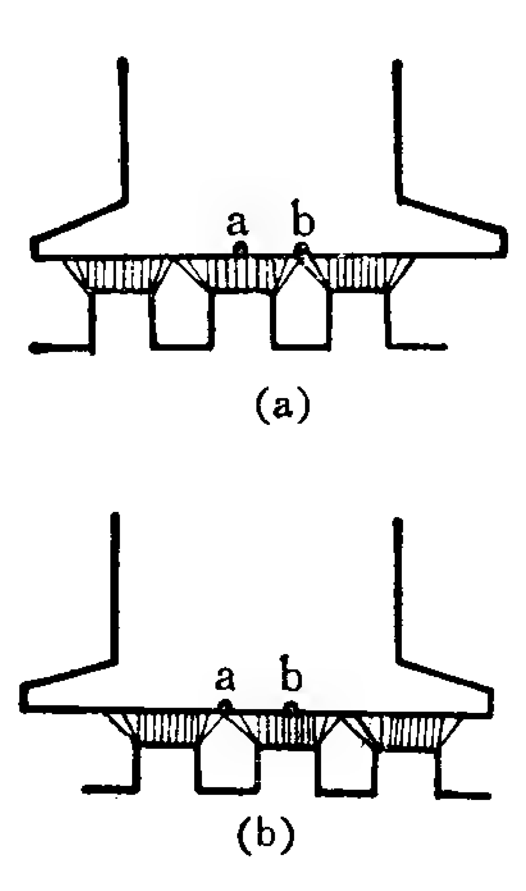


图 6—11

由图 6—11可见，在槽的开口一定时，气隙长度越小，a、b两点磁路长度的差别就愈大，磁密分布就愈不均匀，因而表面损耗也愈大。所以增加空气隙长度，可以减少表面损耗。增加气隙长度不但可以减少表面损耗，而且还可以改善换向，减小火花。根据以上分析可以看出，气隙长度不宜过大或过小，现有电机产品的气隙长度在 0.35～0.8 毫米之间。

串激电动机有时也采用非均匀气隙。图 6—12表示了两种非均匀气隙的构成方式。其中图 6—12(a) 表示在主极极

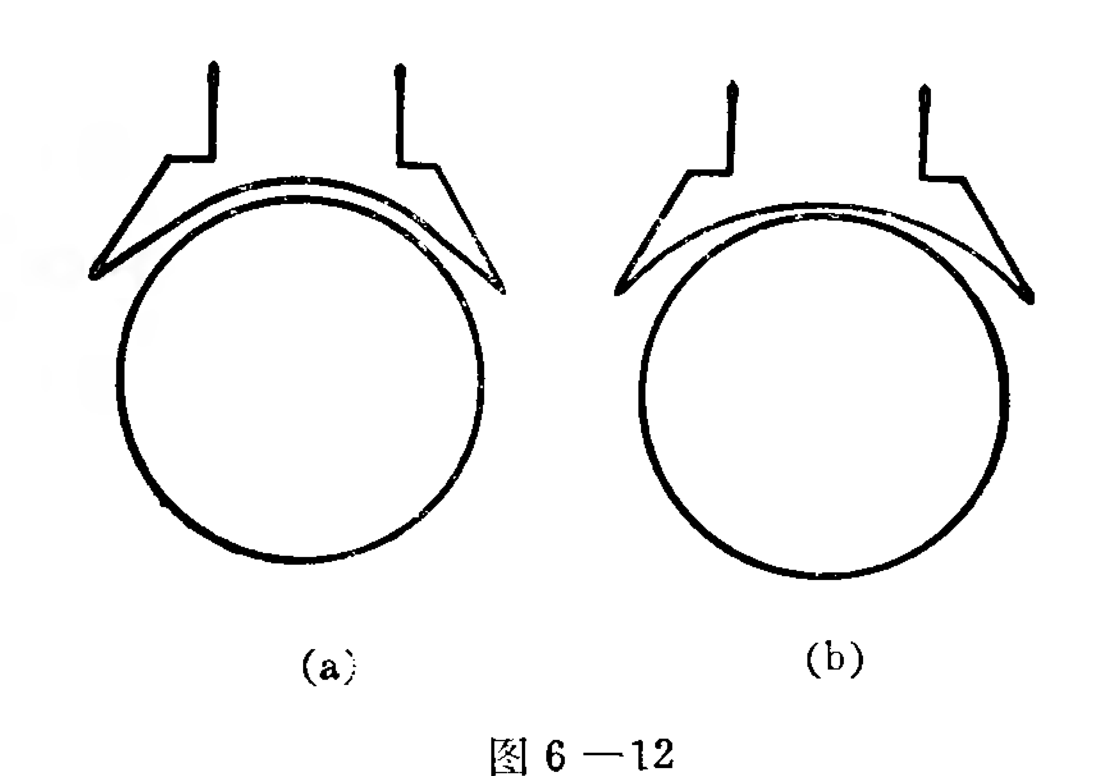


图 6 —12

弧的中间部分（约占整个极弧长度的 $^2/_3$），气隙长度是均匀的。也就是说，这一段极弧与电枢外圆同心。而在这范围以外的极弧是直线，气隙逐渐增大。在极尖处，最大气隙长度约为原有气隙长度的两倍左右，这种情况通常叫做削角。图 6 —12(b) 是另一种非均匀气隙的构成方式。此时主极极弧仍是一段圆弧，但极弧圆心与电枢圆心不重合，而是错开一段距离，这就使得空气隙从极弧中心开始逐渐向两边连续增大，在极尖处的最大气隙可为极中心处最小气隙的 4 倍到 5 倍，这种情况称为偏心气隙，或称为喇叭口气隙。采用非均匀气隙的理由主要是为了减少火花，具体的道理此地不再进行分析。

6 — 4　绝缘结构

串激电动机的绝缘结构与一般中小型电机没有太大的区别。表 6 — 1 就是串激电动机常用的绝缘方式。

表 6—1

导　　线	QZ_2高强度聚酯漆包线
槽 绝 缘	0.15聚酯薄膜青壳纸复合绝缘
浸 渍 漆	环氧无溶剂漆
浸渍次数	滴浸（或浸渍两次）

如果没有环氧无溶剂漆，转子浸渍时可用6440环氧聚酯酚醛漆代替，定子浸渍时可用1032三聚氰铵醇酸漆代替。

串激电动机常常用在电动工具中，为了保证安全用电，必须采用双重绝缘结构。所谓双重绝缘就是除了工作绝缘之外，定子和转子另外还要加上一层保护性绝缘，以防止漏电触电。采用热塑性聚碳酸酯塑料制成的机壳，就可以作为定子的保护性绝缘结构。如果机壳用铝合金制成，则可在机壳与铁心之间加 3 毫米厚的塑料绝缘衬套，来作为定子的保护性绝缘。至于转子，可在轴孔与转轴之间注入4330玻璃纤维压塑料，来作为它的保护性绝缘。也可用增强尼龙1010塑料，或塑料风扇将轴齿段与铁心轴段接在一起（通常称为接轴工艺），以阻断电枢与工作头部分的电气联接，这也是转子保护性绝缘的方式之一。

第七章　串激电动机的故障分析与修理

串激电动机的故障与负载情况、维护检修及设计制造质量等因素有关。同一种故障可能有不同的表面现象，而同一种现象也可能由不同的故障所引起。因此故障情况是多种多样的，故障的分析与检查也是很复杂的，需要在实践中积累起一定的经验，才能进行正确的判断。

7－1　一般故障情况

修理任何电机都应从调查故障入手，只有故障情况了解清楚了，才可针对故障情况进行修理，以免修理好以后的电机重新发生类似的故障。如前所述，由于同一种故障可能有不同的表面现象，而同一种现象也可能由不同的故障所引起，因此在分析故障时，要忌带片面性、表面性和主观性，对具体电机作具体分析。表7－1简要地介绍了串激电动机的一般故障情况及其处理方法，可以作为修理时的参考。

表 7－1　串激电动机故障检查处理表

故障	原　　因	处　理　方　法
电动机不能启动	1.负载过重。	1.减少电动机负载。
	2.轴承太紧以致电枢被轧住。	2.把端盖内孔或轴承颈刮削一下，再把轴承洗擦干净或者重换轴承。
	3.保险丝熔断。	3.装上一定规格的保险丝。
	4.电枢、激磁绕组及各连结线有开路通地等故障。	4.测量各绕组的直流电阻、电压降或绝缘电阻，确定故障原因，并消除之。
	5.电动工具中齿轮耦合不好。	
	6.电刷和换向器接触不良。	6.检查电刷弹簧压力，检查电刷在刷盒中是否轧住。
	7.激磁绕组接反。	7.用指南针对各激磁绕组进行检查。
电机转速太高	1.电源电压太高。	1.降低电源电压，或在电枢回路中串一电阻。
	2.电刷位置不对，或元件到换向器片上的焊头位置不对。	2.见 5－3 节。
	3.激磁回路有短路通地等故障。	3.测量直流电阻或绝缘电阻，检查出故障所在，并消除之。

故障	原因	处理方法
电动机转速太慢	1.负载过重。	1.减少负载。
	2.电枢里有短路、开路、故障。	2.见7—2、7—3节。
	3.轴承太紧。	3.把轴承洗刷干净，重新加上干净的润滑油。
	4.电源电压低。	4.提高电源电压到额定值。
	5.换向片有短路、通地故障。	5.见7—7节。
	6.电刷位置不对，或元件到换向器片上的焊头位置不对。	6.见5—3节。
电刷下冒火花及换向器电刷剧烈发热	1.电刷与换向器接触不好。	1.将换向器用砂布打磨。
	2.换向器表面不平，片间云母突出。	2.见7—7节。
	3.电刷牌号或尺寸不合适。	3.见7—8节。
	4.刷盒松动或装置不正。	4.紧固或纠正刷盒位置。
	5.电刷压力不适当。	5.调整电刷压力。一般串激电机压力应为200—400克/厘米^2。电动工具用串激电机压力为300—500克/厘米^2。
	6.换向器表面不光洁、不圆或有油污。	6.清洁或研磨换向器表面。

故障	原　　因	处　理　方　法
	7.电机振动。	7.紧固或平衡电机。
	8.电机过载。	8.减少负载。
	9.电枢绕组有短路、开路、通地、反接等故障。	9.见7—2、7—3、7—4、7—5节。
	10.激磁绕组通地，短路等故障。	10.见7—6节。
	11.电枢绕组元件到换向器片上的焊头位置不对。	11.将电刷移到不发生火花位置，如电刷不能移动，则需将线头重新焊接。
	12.换向片短路、通地。	12.见7—7节。
电机运转时发热	1.电机超载。	1.减少负载。
	2.电机绕组中有短路、通地故障。	2.测量绕组片间电压或绝缘电阻，检查出故障后消除之。
	3.电源电压过高。	3.降低电压到额定值。
	4.通风散热不好。	4.检查环境温度是否过高，风扇是否脱落，风扇旋转方向是否正确，电机内通风道路是否被堵塞。
	5.换向器发生火花	5.见前面电刷冒火花一栏。
	6.轴承太紧。	6.把轴承洗刷干净，重新加上干净的润滑油。

故障	原　　　　　因	处　　理　　方　　法
电机运行时有噪音	1.轴承磨蚀，使电枢和极靴相碰。	1.换装新轴承。
	2.换向片凹凸不平或云母片突出。	2.见7—7节。
	3.电刷太硬。	3.换用较软电刷。
	4.电刷压力太大。	4.调整弹簧压力。
换向片上有烧焦黑斑	1.换向片和元件焊接不良。	1.重新焊接。
	2.绕组元件有开路故障。	2.见7—2节。
反向旋转时火花大	1.电刷位置不对。	1.调整电刷位置。
	2.电刷分布不均匀。	2.设法使电刷均匀分布。
	3.元件到换向片上焊头位置不对。	3.见5—3节及7—5节。
电机冒烟	1.电刷下火花太大。	1.见前面电刷下冒火花一栏。
	2.电枢绕组有短路故障。	2.见7—3节。
	3.电枢绕组各元件间充满电刷粉末及油垢，引起燃烧。	3.清除吹净这些油垢或粉末。

7—2　转子绕组开路故障的检修

转子绕组是电机中最重要的部件，机电能量的转换就是

通过转子绕组而实现的，但转子绕组又是电机中最易损坏的部件，电气故障中的绝大多数都是发生在转子绕组中，再加上串激电动机转子往往又是高速旋转的，出现故障的可能性就比其他类型电机更大。

图7—1表示转子绕组各种故障的示意图。转子绕组经常发生的故障有：开路（元件4）、脱焊（元件5—6及元件16）、短路（元件7及元件8—10）、通地（元件15）、焊头位置错误（元件11、12、13）、元件反接（元件2）等。在这一小节中我们首先研究开路故障的检修。

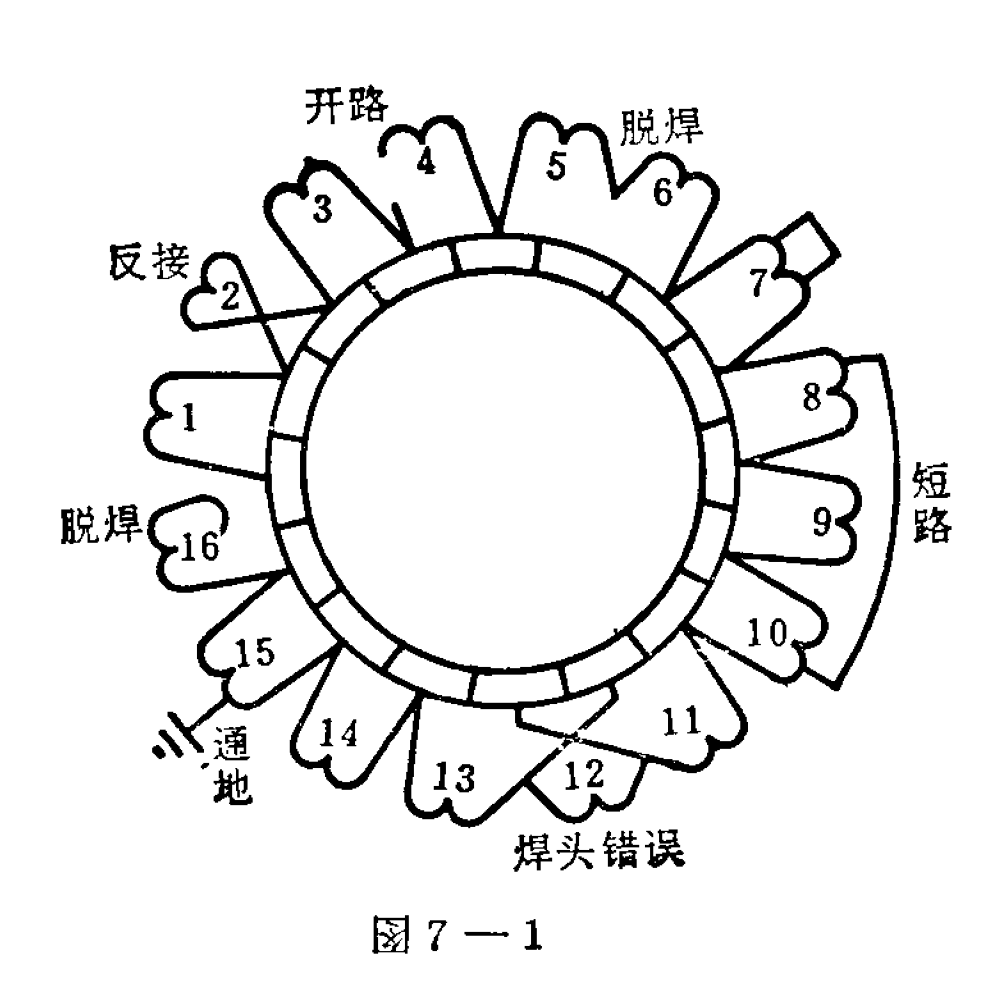


图7—1

转子绕组开路一般最易发生在绕组与换向器焊接的地方，因为电机运转时，换向器容易发热，如果焊接不好，在离心力的作用下，绕组和换向器极易脱焊，因而形成了绕组开路。当然绕组开路也可能发生在铁心的槽内部分，这种情况，大多数是由于绕组发生了短路或接地，电流过大，将线圈烧断形成的。

一、电机性能上的表现

由于断路情况的不同，电机表现出来的性能也不一样，有下面两种情况：（1）电机根本不能起动。（2）电机仍

能起动，但转矩小，火花大，电机振动。理由分述如下：

1. 如图7—2所示，如果转子绕组有两个地方开路，而且这两个开路的地方又分别处于不同的磁极之下，那么合上电源后，电机根本不能起动。因为从图7—2可以清楚地看出，磁极下面两条支路都断开了，两条支路中都没有电流流过，因而都产生不了转矩，所以合上电源后，转子是不会旋转的。

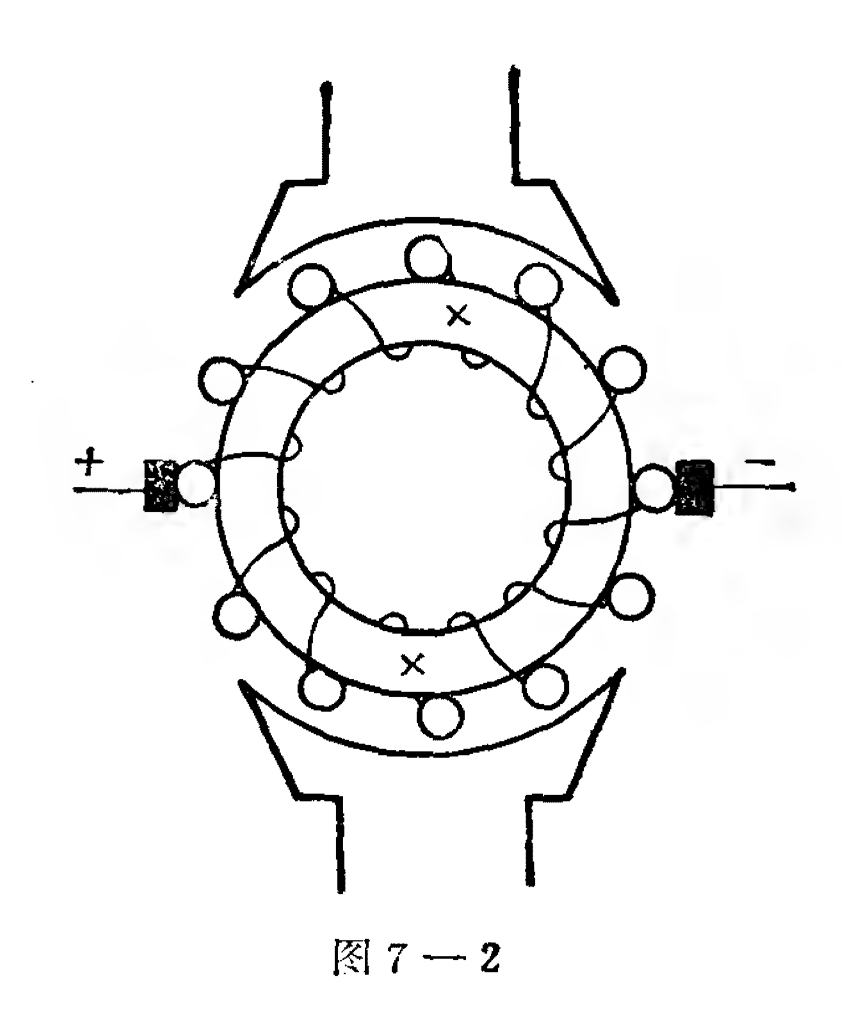


图7—2

2. 如图7—3所示，如果转子只有一个地方开路，电机仍能起动，但转矩小，火花大，电机振动。从图7—3(a)可以看出，转子绕组只有一个地方开路，例如N极下这条支路断开，但S极下这条支路中仍有电流流过，S极下这部分导体仍能产生转矩，所以电机仍能起动，空载时转速接近正常。但是转子中只有一半的导体能产生转矩，所以总的转矩要比正常电机小，带上负载后，转速会急剧的下降。而且由于转子旋转的缘故，开路位置一会儿处于N极之下，S极下导体有电流流过，产生转矩〔图7—3(a)〕；一会儿开路位置又处于S极下，N极下导体有电流流过，产生转矩〔图7—3(b)〕。电机受力情况不平衡，因而容易振动。

如果电机通电后，有上述现象表现出来，则转子绕组中

(a)　　　　　　(b)

图 7 — 3

便有开路的可能，可以通过下面方法进一步的检查。

二、外观检查

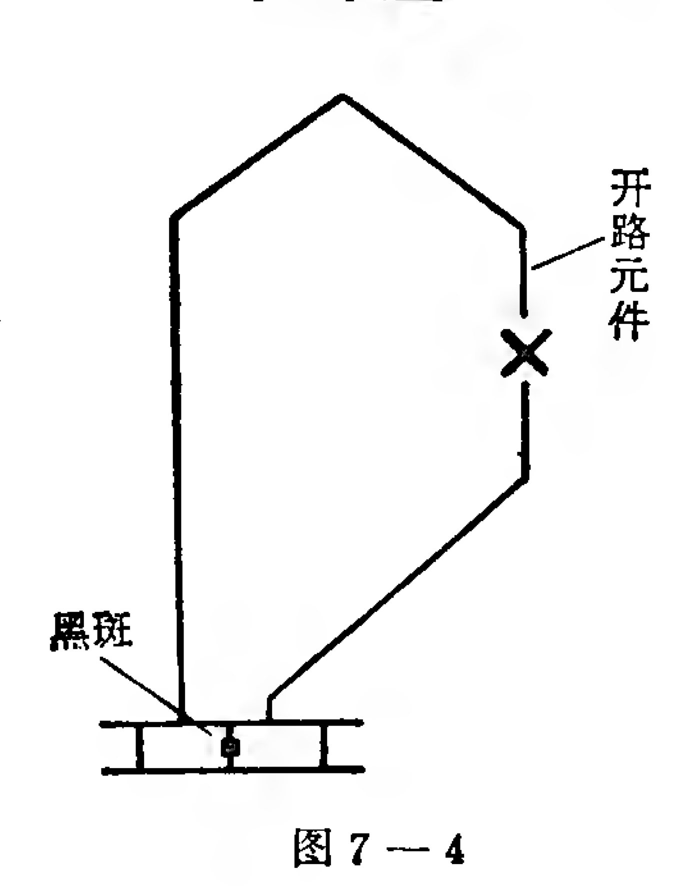


图 7 — 4

如图 7 — 4 所示，首先观察换向器片上有无烧焦的黑斑，如果有黑斑，那么有黑斑的两换向器片所联接的元件，就有开路的可能。

开路元件所接的换向器片间之所以会有黑斑，可以通过图 7 — 5 来说明。在图中假定电枢逆时针方向旋转，电流是从电刷A流入，从电刷 B 流出。如果在换向器片 1 与 8 之间

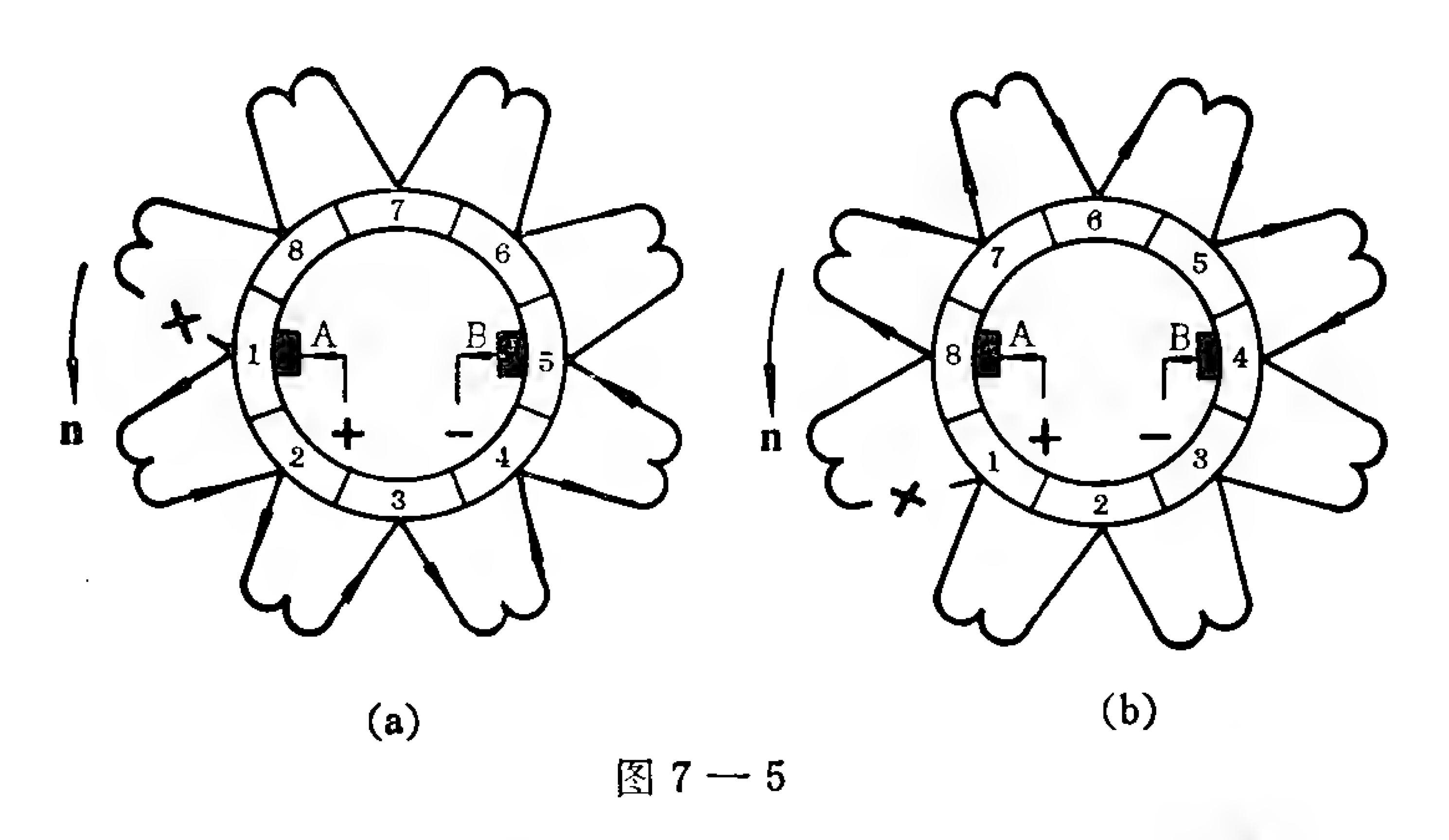


图 7 — 5

有个开路元件，那末，在图 7 — 5 (a)所表示的位置，电刷A与换向器片 1 相接触，电流从电刷A 流经换向片 1 ，从下面一半电枢绕组流到电刷B。当电枢转过一个角度后，便得到图 7 — 5 (b)，电刷 A与换向器片 1 分离而与换向器片 8 接触，此时电流从电刷A 流经换向器片 8 ，从上面一半电枢绕组流到电刷B。在电刷A同换向器片 1 将要分离的那一瞬间，下面这一半电枢绕组电流被强迫拉断，如同一个开关拉开时一样，必然要产生火花，于是在换向器上烧成黑斑。此时，可以将开路元件从换向器片拆下，进一步用万用表或试灯来检查，若元件不通，开路故障便可确定。

这里必须指出，开路元件所联接的两换向器片间有烧焦的黑斑，但有黑斑的换向器片并不一定都有故障。例如：当一个槽中有两个元件并列时〔图 4 — 5 (b)〕，每隔两个换向器片可能出现黑斑。当一个槽中有三个元件并列时，则每隔三个换向器片可能出现黑斑。如果换向器上有上述均匀分布的黑斑，这只能说明换向情况尚不理想，但转子绕组并未出现故

障。

三、检查片间电压法

将一个低压直流电源（例如干电池、蓄电池、或直流电源串几个灯泡）通入电枢绕组，如图7—6所示。这样，电枢绕组分为两条支路，在下面四个元件（即元件1、2、3、4）组成的支路中，无开路元件，有电流流过。而上面四个元件（即元件5、6、7、8）组成的支路中，有开路元件(即元件7)，因此无电流流过。对于有电流流过的这条支路而言，每个元件必有电阻压降，电池电压就均匀降落在这四个元件上。如果电池电压是8伏，则每个元件上的电压降就是2伏。从图7—6可以明显地看出，每个元件上的电压降，就是相邻两个换向器片之间的电位差，如果用电压表测量换向器的片间电压时，就有2伏的读数。但对于有开路元件的那一条支路而言，显然就不会有电流流过，元件上也就不会产生电阻压降，此时用电压表测量包含开路元件这一条支路的片间电压时，就不会有任何读数。但是，当测量到开路元件所接的换向片时（图7—6中换向片7和8），读数为电源电压的数值，其理由也可以通过图7—6来解释，电压表的一端通过换向器片8与元件8，同电池正极相连

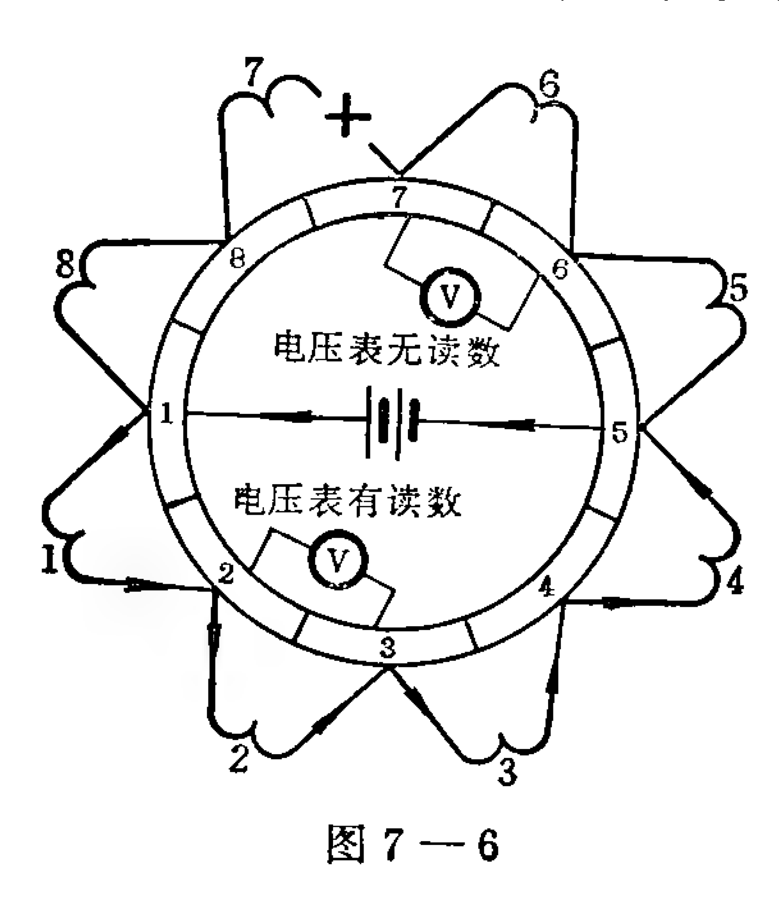


图7—6

接，电压表的另一端通过换向器片 7 与元件 6 和 5，同电池的负极相连接，电压表正好跨接在电池两端，因此读数正好为电池的电压值。

通过上述方法检查，电压表读数为电源电压值的地方，就是开路元件所在处。

四、开路故障的处理方法

如果开路的原因是元件和换向片的焊接头松脱或焊接不好，那末，可以重新焊接。假如元件断路的地方处于槽内，最妥当的办法是拆出重绕。若需要紧急修复，也可以采用图 7—7 所表示的跨接法修理。当电路断开，电流无法流通时，如果我们按照图 7—7 所表示的方法，将开路元件所连接的两个换向器片用导线跨接起来，则电流可以从跨接导线处流过，电路接通了，电机仍然可以工作。但是，这只是一种临时的紧急修复措施，电机的性能是要受到影响的。如果对图 7—6 的开路故障进行跨接修理便得到图 7—8。从图 7—8 可以清楚地看出，元件 7 虽然断开，但由于换向器片 7 与 8 之间已用导线跨接起来，所以上面这一条支路仍有电流流过，电机仍然能够工作。但是对于图 7—8 这个具体电机而论，上面一条支路只有 3 个元件，而下面一条支路是 4 个元件，两条支路元件数不一样，电气上已不平衡，电机

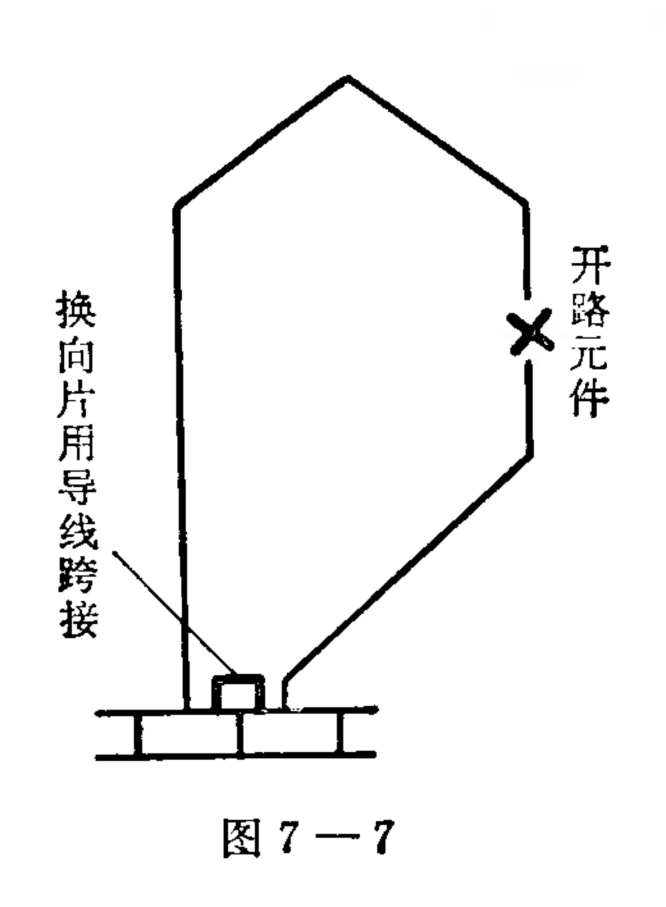


图 7—7

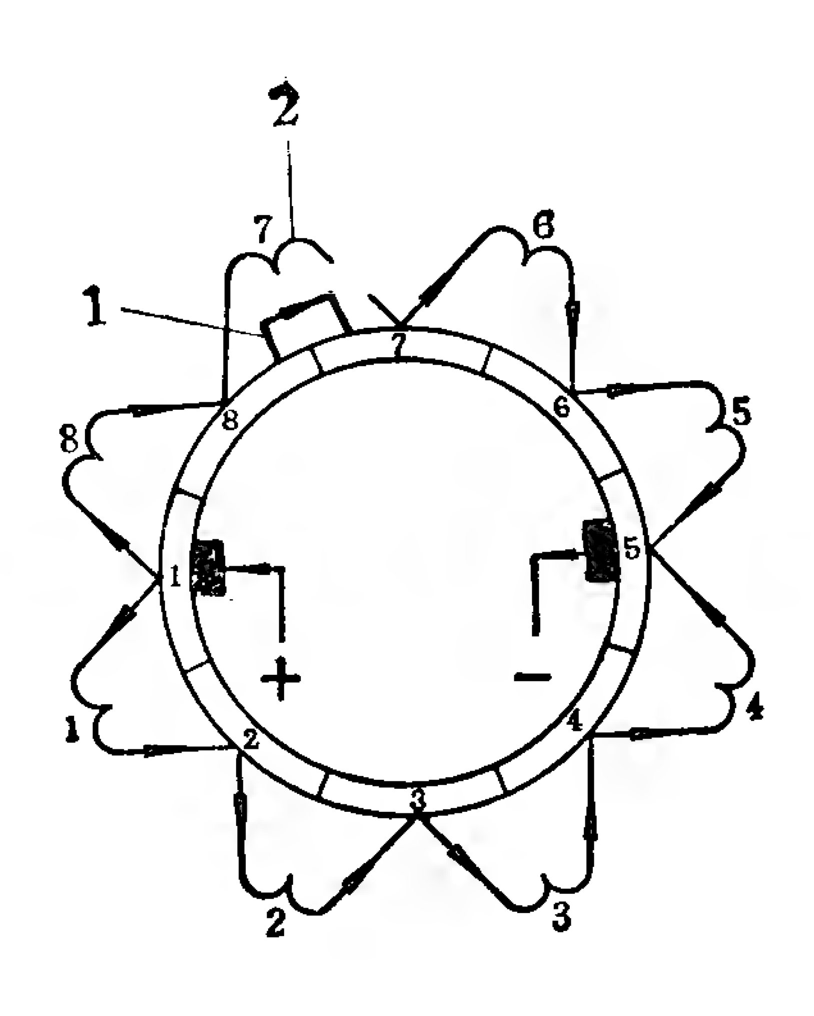


图7—8

1—跨接线　　2—开路元件

的性能就会受到影响。如果一个电机换向器片数比较少，也就是电机的元件数比较少，某支路少了一个元件，对电气上的平衡会带来比较显著的影响，电机的性能也就会产生比较大的变化。

7—3　转子绕组短路故障的检修

当一个元件内部有几匝导线因绝缘损坏而互相接通（图7—1中元件7），或者某一个元件和其他元件因绝缘损坏而接通（图7—1中元件8与10），就是短路故障。此时电机性能上的表现是：转速较慢，声音低沉，电刷下火花较大，短时间内，电机便冒烟或发热严重。电流较大，空载电流可能大于满载电流。造成短路故障的原因一般是：

1. 在转子旋转过程中，由于电刷与换向器经常磨擦，总会有些铜屑碳末积留在两个换向器片之间的槽中，这些能导电的杂质积累多了，就会使换向器片接通。从图7—9

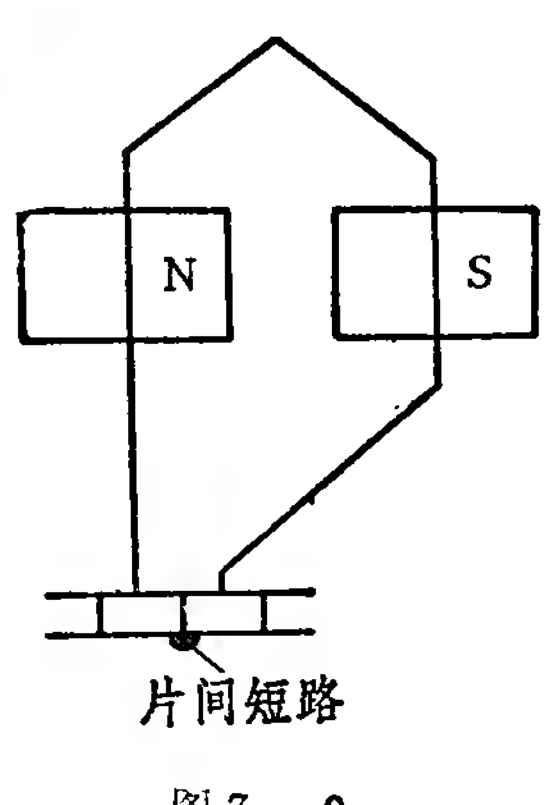


图7—9

可以看出，当两个相邻的换向器片接通时，与这两个换向器片连接的元件就短路了，称为片间短路。短路元件中将产生很大的短路电流，因为在图7—9中，元件的两个边均切割定子磁通而产生感应电势，当元件短路以后，这个感应电势便在短路元件中产生短路电流，由于短路元件的阻抗很小，因此短路电流的数值很大。若能及时查出故障，消除片间短路，电机即可正常运行。若短路时间较长，过大的短路电流使元件绝缘烧毁，短路情况就无法挽救了。

2.电机长期过载，电流太大，致使绕组温度太高，烧坏绝缘，形成短路。

3.在下线过程中，如果有铁屑等杂物落入槽中，刺破导线绝缘也会形成短路故障。如果腐蚀性的化学物品，如焊锡膏等落入槽中，也会使绝缘损坏而形成短路。

4.如果电机长期受潮，绝缘电阻下降太多，运行时，因绝缘击穿也会形成短路。

短路故障的检查方法有下面两种：

一、测量片间电压法

如图7—10所示，将低压直流电源通入转子绕组，再用一只电压表依次测量两相邻换向器片之间的片间电压，如果电压表上的读数大小相差不远，表示这些换向片上所接的元件都是好的。倘若某两片之间的片间电压比一般的小或为零，那就是这两个换向片所连接的元件短路了。这是因为：片间电压的数值就是元件上的电阻压降，当元件完全短路以后（如图7—10中换向器片4、5之间所接的元件4），电流从短路处流过，而不流过元件，该元件不产生电阻压降，因此和它连接的换向器片就测量不出电压了。如果元件部分短路，

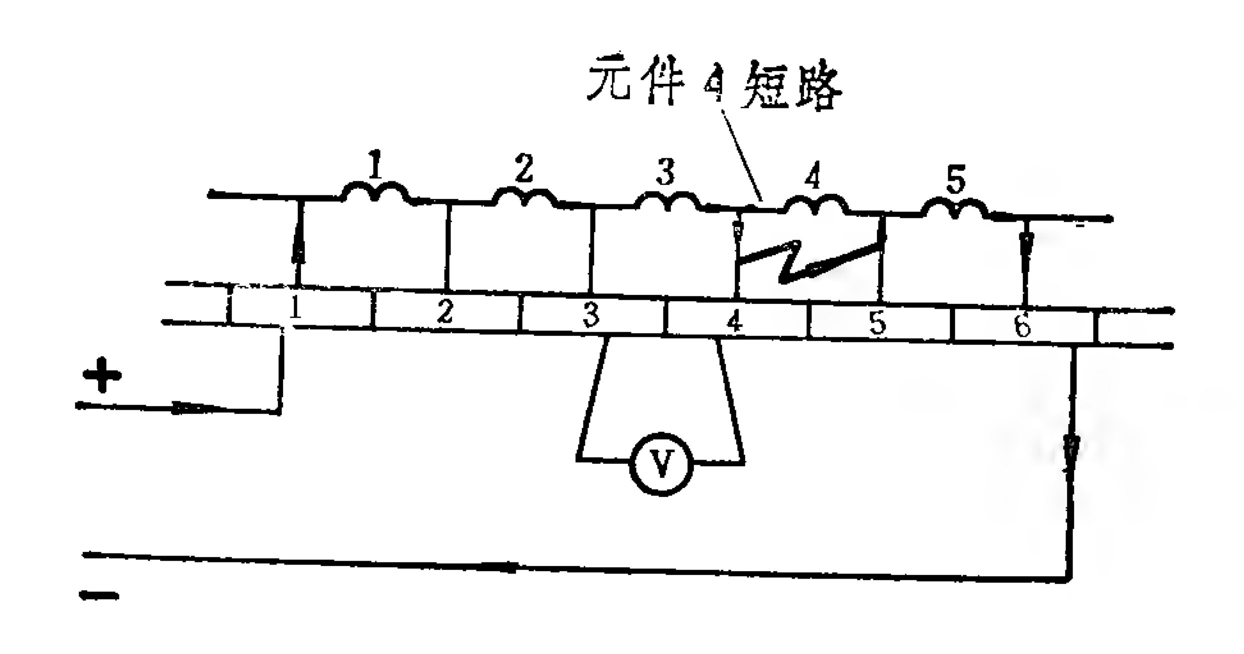


图 7 —10

则只有未被短路的那一部分元件尚有电流流过，所产生的电压降当然比一只完好的元件所产生的电压降小，所以片间电压就低。因此，测量片间电压的数值，可以判断元件是否短路。电压表读数等于零，表示元件完全短路，电压表读数比一般正常的小，表示元件部分短路。

二、短路测试器法

图 7 —11是利用短路测试器检查元件短路 情 况 的示意图。将测试器放在所要检查线圈的槽口上，然后将测试器的线圈通入交流电。这时测试器铁心与定子铁心构成一个磁回路，磁通路径如图 7 —11中虚线所示。测试器的线圈相当于变压器的初级，而被检查的槽内线圈相当于变压器的次级。根据变压器的基本原理我们知道，当次级短路时，初级电流一定较大。因此可以推论，当被检查的线圈短路时，串在测试器线圈里的电流表读数一定较大。如果没有电流表，也可用一小块铁皮放在被检查线圈的另一边槽口上来测试。如果被检查的线圈短路，这个线圈内便有交变电流流过，围绕着这个

线圈将产生交变磁通，放在槽口的小铁皮被交变磁通反复吸引而产生振动，于是发出吱吱声。

在使用短路测试器时一定要注意：必须先把测试器放在转子铁心上，然后才去合上交流电源，此时线圈中电流较小。如果测试器倘未放在转子铁心上而把交流电源合上，此时线圈中电流很大，时间一长，测试线圈可能会烧坏。如果要自制短路测试器，有关它的简单计算方法，请查阅西安交通大学“七·二一”电机试点班编“电机修理”一书。

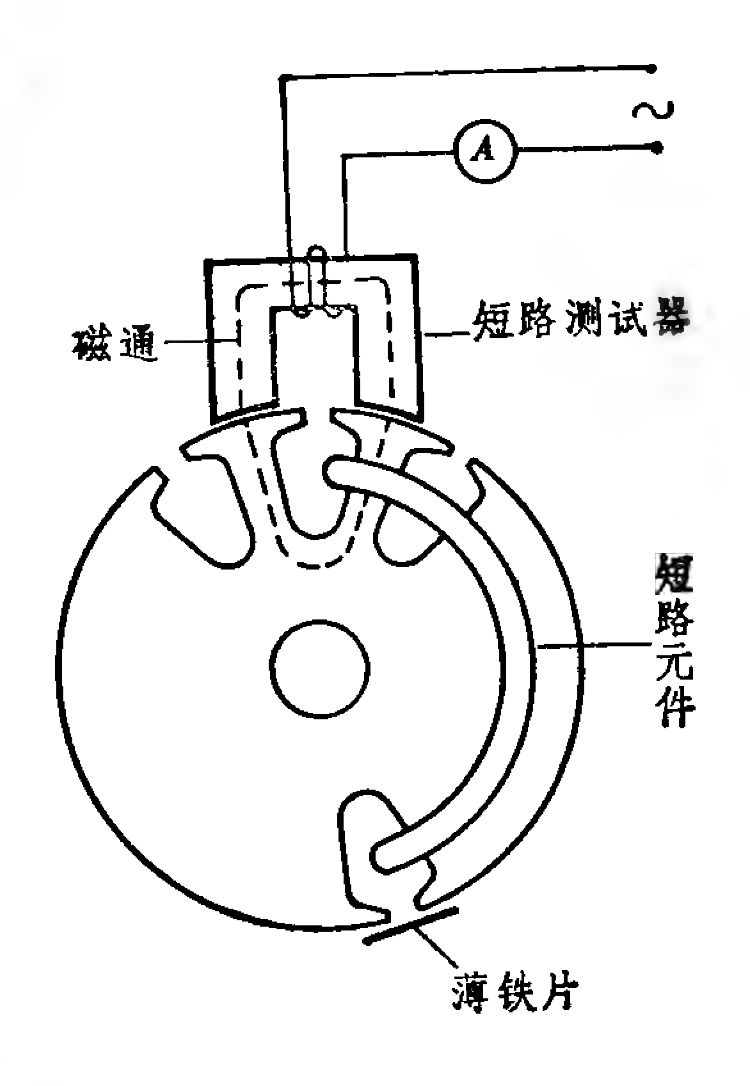


图 7—11

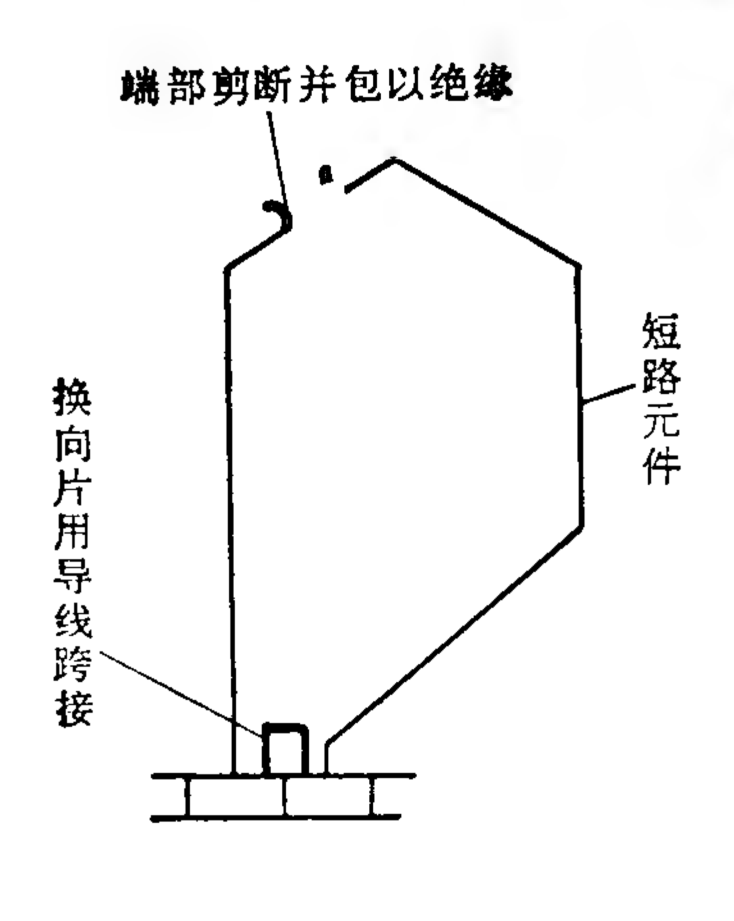


图 7—12

如果绕组因受潮而引起局部短路，可以把它烘干后，再检查一次。如果这台电机使用已经比较长久，同时短路的元件又不止一个；或者受热情况严重，而使绝缘焦脆，那最好是把整个绕组拆除重绕。如果短路情况不太严重而又希望作紧急修复，也可以采用类似图 7—7 的跨接修理法，具体方

法如图 7 —12所示。首先将短路元件从端部剪断，并将断头用绝缘材料包扎起来，以防止断头相碰使元件重新短路。端部剪断以后，这个短路元件便成为开路元件了，因此可以用修理开路元件的方法进行修理，即用一根导线将这个元件所联接的换向器片跨接起来就行了。短路元件跨接修理能否成功的关键，在于能否顺利的将此短路元件端部剪断，以消除短路故障。因为有些元件的端部埋在绕组的最下层，根本无法剪断。或者在剪断过程中，碰坏了其他元件，使故障扩大。

7 — 4　转子绕组通地故障的检修

一般情况下，绕组通地故障发生在下列部位：

1. 通地故障最容易发生在铁心两端的槽口处，因为在该部位，元件端部弯曲较大，槽绝缘很容易被槽口处的铁心刺破，形成通地故障。

2. 通地故障也可能发生在槽内，这是由于槽内有毛刺、尖角，或者有其他金属杂物，刺破了槽绝缘而形成通地故障。

3. 通地故障也可能发生在换向器处。这是由于潮气污物等使换向器绝缘受到损害，通电后绝缘被击穿而形成通地故障。

通地故障可用下面几种方法进行检查：

一、外观检查

由于通地故障最容易发生在槽口部位，因而在检查通地故障时，首先观查每一个元件在槽口处的绝缘有无破裂，及槽内绝缘有无移动，使元件直接与铁心相碰而形成通地。如果外观检查不出，可进一步用下列方法检查。

二、用摇表或试灯检查通地

通地故障最常用的检查方法是利用摇表。如果没有摇表也可用图 7—13的方法进行检查。电源的一根线直接接到转轴上，另一根线串联一个灯泡接触换向器片。如果灯泡不亮，说明电路不通，无通地故障。如果灯亮，说明电路已通，绕

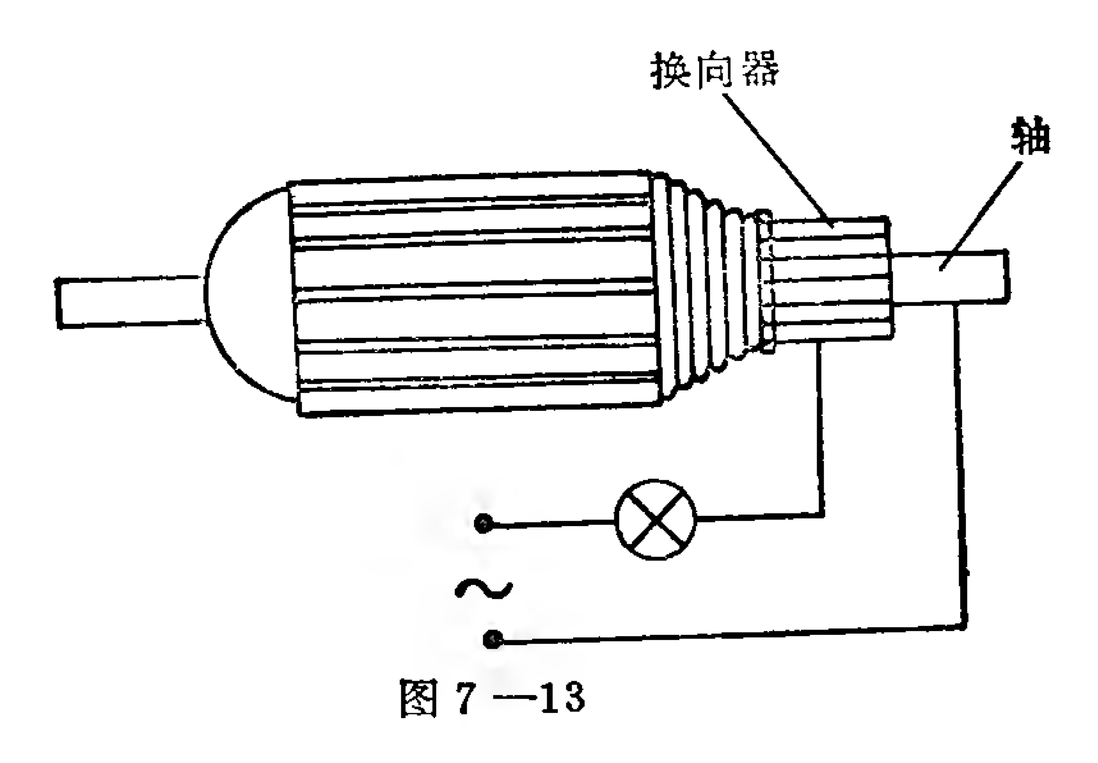


图 7—13

组或换向器片已与转轴接通，有通地故障。这种以灯泡明暗来判断故障的方法，称为试灯检查法，是判断故障常用的方法之一。由于摇表电压较高，容易检查出通地故障，而试灯电压较低，在通地故障不太明显时，往往检查不出来。因此只有在没有摇表时才用试灯法检查。

三、检查转轴与换向器片之间的电压

如图 7—14所示，将低压直流电源通入电枢绕组，然后将电压表的一端引线固定在转轴上，另一端引线用以分别接触每个换向器片。这里有两种情况：(a)当绕组无通地故障时，由于转轴不带电，绕组与转轴之间无电位差，因此在图 7—14(a) 中，测量任何一个换向器片与转轴之间电压时，电压表均无读数。(b) 如果绕组有通地故障，则大部分换向

器片与转轴之间均可量出电压，而只有通地元件所连接的换向器片与转轴之间，或者电压很小，或者电压为零。这个道理可以通过图 7 —14(b) 来解释。这是因为低压直流电通入电枢绕组中以后，每个元件都有电流流过，都要产生电压降落。在图 7 —14(b) 中，如果元件 1 通地，则换向器片 2 与转轴直接联通，测量转轴与换向器片 4 之间的电压，就是测量换向器片 2 与换向器片 4 之间的电压，也就是测量元件 2 、3 上的电压降落，电压表上当然就有读数了。但是当测量换向器片 2 与转轴之间电压时，由于元件 1 已与转轴联通，换

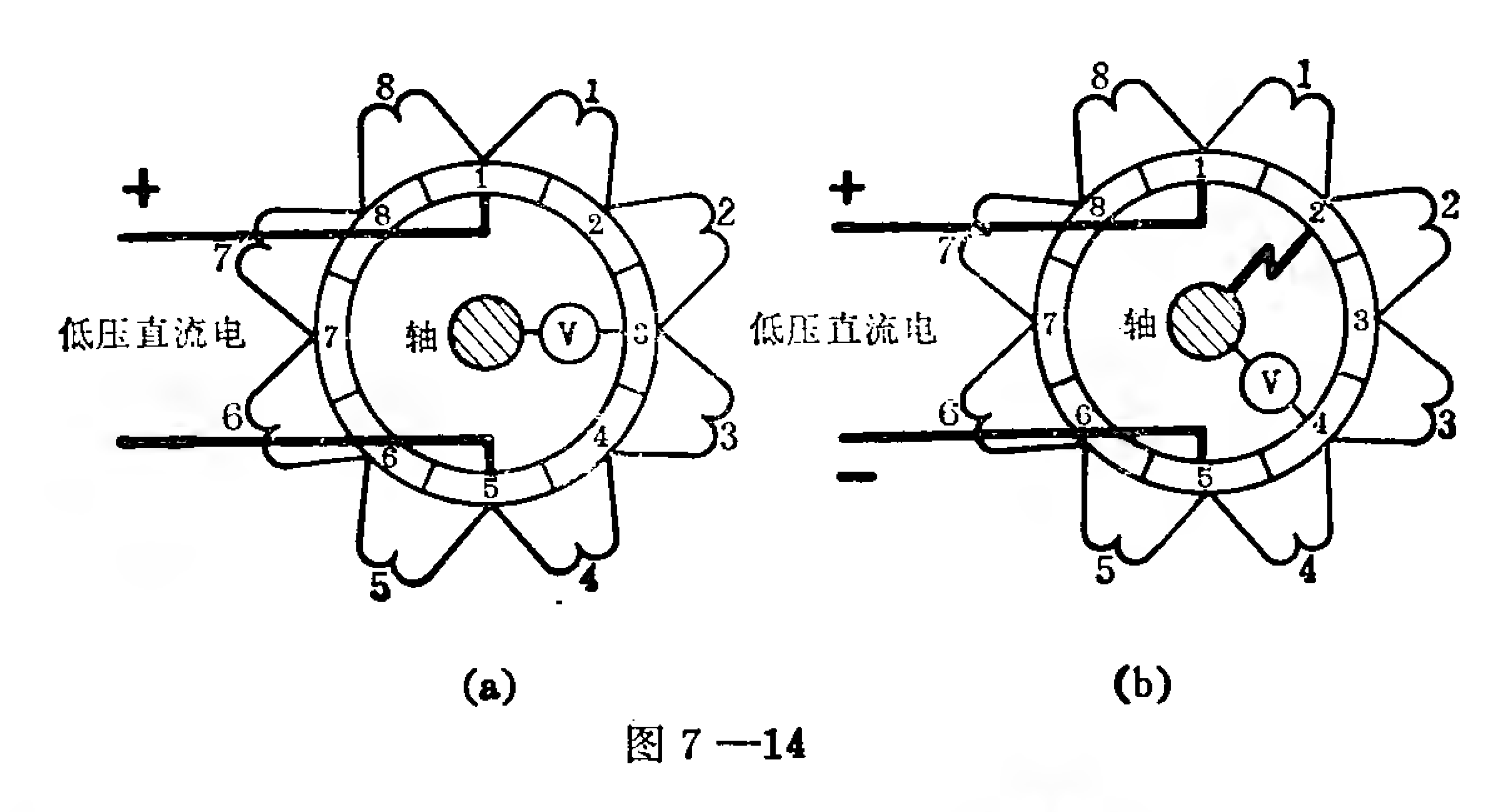


图 7 —14

向器片 2 与转轴之间是等电位点，所以测量换向器片 2 与转轴之间电压时，电压表就没有读数了。一个元件往往由许多匝所组成，如果电压表上读数很小，就表示是在元件中间部位通地，仍有一部分电压降落被测量出来，所以电压表上仍有一个很小的读数。

四、分组检查法

如图 7 —15所示，先将换向器上任意相对的两个换向器

片（如图 7 —15中换向器片 1 及 5 ）所联接的元件拆下来，把整个绕组分成两部分，将试灯(或摇表)的一端接在转轴上，分别测量这两组绕组，将通地的一组找出来。然后把通地的这一部分绕组再分成两部分，用同样的方法进行检查，直到找到通地元件为止。

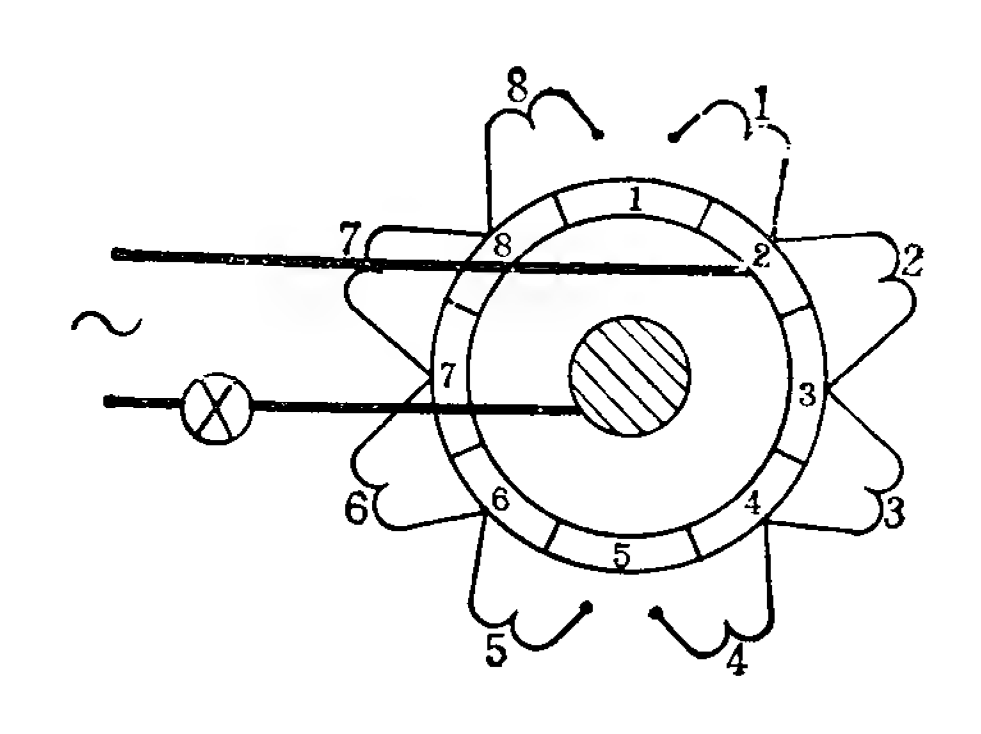


图 7 —15

五、冒烟或火花法

将交流电源串联一个瓦数很大的灯泡或电炉丝，再接到转轴和换向器上，这时，电枢绕组通地的地方就会产生高热而冒烟，或者发生火花，从而找出通地元件。若有试验变压器则可以用图 7 —16所示方法进行检查，接地的地方同样会产生火花。使用时用调压器逐渐升高电压，同时必须注意安

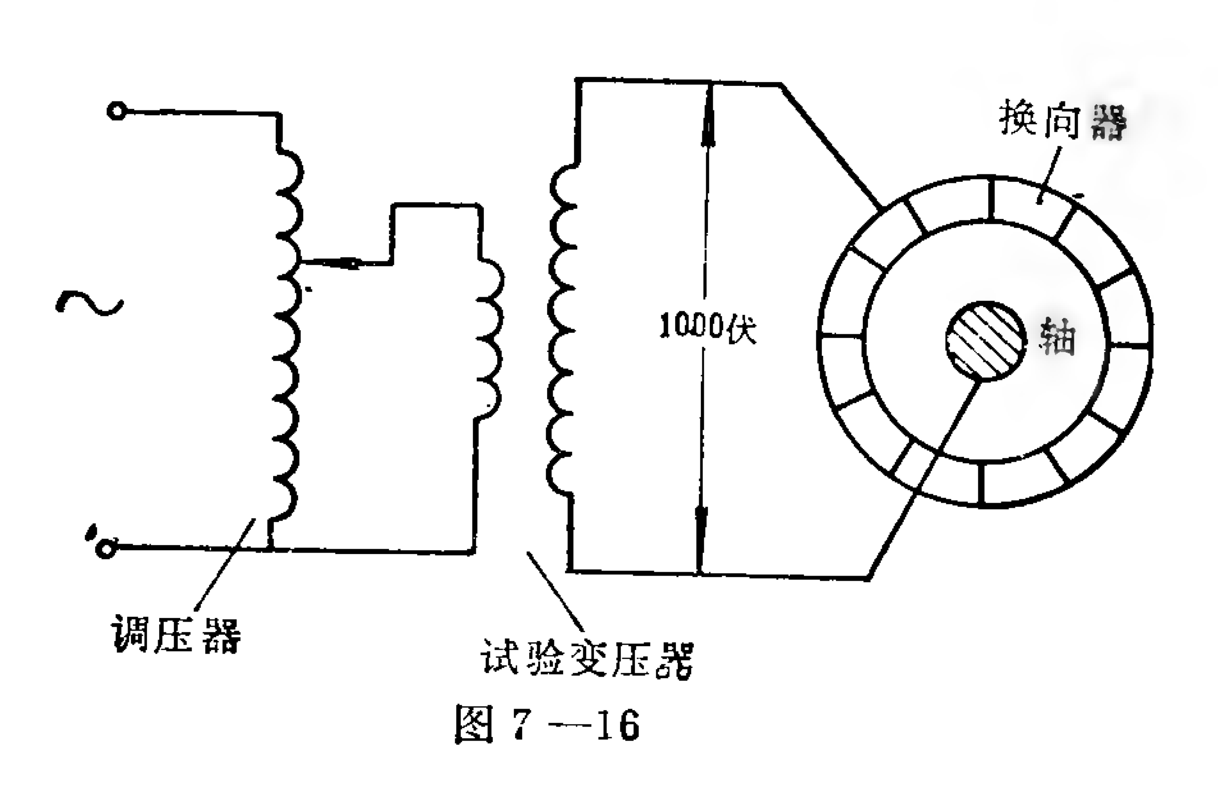


图 7 —16

全。

现在生产的电动工具已倾向于采用双重绝缘结构，在铁心与转轴之间有一层保护性绝缘。此时要测量绕组与铁心之间是否接通，或铁心与转轴之间是否接通，可以仿照上面介绍的方法进行。

根据通地故障的具体情况，可以有下面三种修理措施。

1. 如果通地故障发生在绕组的外面，如槽口或端部，可用竹片将绕组与铁心相碰处撬开，再在绝缘破损处重新插上绝缘材料即成，一般情况下，这种故障比较好修。

2. 如果通地故障在槽内，无法重新绝缘，也可以采用类似图7—7的跨接修理法，具体方法如图7—17所示。首先把通地元件从换向器片上拆下，使它与整个绕组分开，以消除通地故障。并把拆下的两个端头用绝缘材料包扎起来，以防止它们彼此相碰成为短路元件。然后用一根导线将这个元件所对应的两个换向器片短接起来，使电路重新接通。

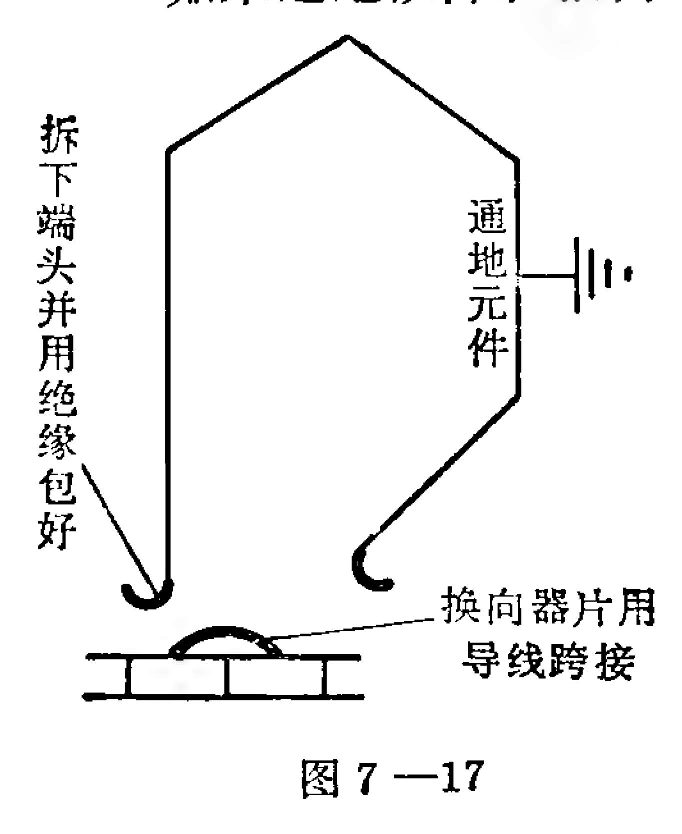


图7—17

3. 如果通地点发生在换向器部位，可参照7—7节的方法进行修理。

7—5　元件反接或焊头位置错误

这种故障往往发生在绕组重绕之后，由于接线时粗心大意，把元件到换向器片的两个线头接反了。可能产生两种反

接的情况：（1）元件反接（图7—18中元件2）。从图7—18可以看出，元件之间正确接线应该是：元件之间首尾相联。如元件3的尾端与元件4的首端相联，元件4的尾端与元件5的首端相联，这样串联下去，直到绕组成为一个闭合回路。但元件2与元件1之间却是尾—尾相联，元件2与元件3之间却是首—首相联，那元件2便是反接了。（2）焊头位置错误（图7—18中元件12、13、14）。从图7—18可以看出，元件12、13、14之间串联方法是正确的。元件12的尾端与元件13的首端相联，元件13的尾端与元件14的首端相联，首尾相联的接法并未错误。但元件串联好以后，并头到换向器片的焊头位置错了，元件12、13之间的并头应焊到换向器片12，但实际上却焊到换向器片13，而元件13、14之间的并头应焊到换向器片13，但实际上却焊到换向器片12，这种焊头错误将引起元件13反接。不论是元件反接或是焊头位置错误对电机性能都会带来不利的影响。

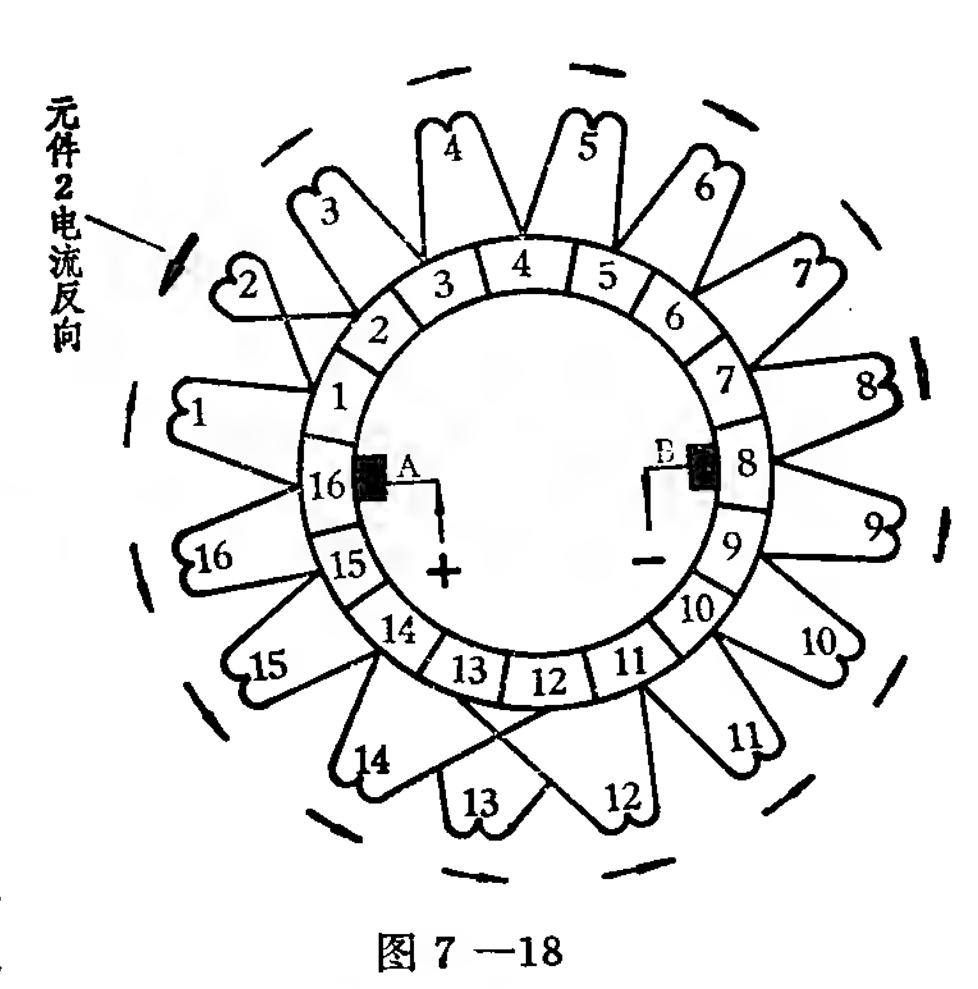


图7—18

1. 如果是元件反接，电机的转矩便会减少。这个道理可以通过图7—18来解释。在图7—18中，上半部分由元件1、2、3、4、5、6、7、8组成的支路中，如果元件2反

接，那么元件 2 中的电流便会反方向流动，因此元件 2 所产生的电磁转矩方向也会与其他元件产生的转矩方向相反，转矩互相抵消掉一部分，所以总的电磁转矩便减少了。如果是焊头位置错误，例如图 7 —18中的元件12、13、14，这三个元件中的电流并未反方向流动，不会产生反方向的转矩，所以总的电磁转矩不会减少。

2. 如果是焊头位置错误，换向情况便会恶化，容易产生火花。这个道理可以通过图 7 —19 来说明。其中图 7 —19 (a) 是接线正确时情况，电刷只短路一个元件(即元件12)，因此只有一个元件在换向。图 7 —19(b) 是接线错误时的情况，此时电刷短路了两个元件(即元件12、13)，因此是两个元件串联起来以后同时换向，换向元件的匝数增加了一倍，

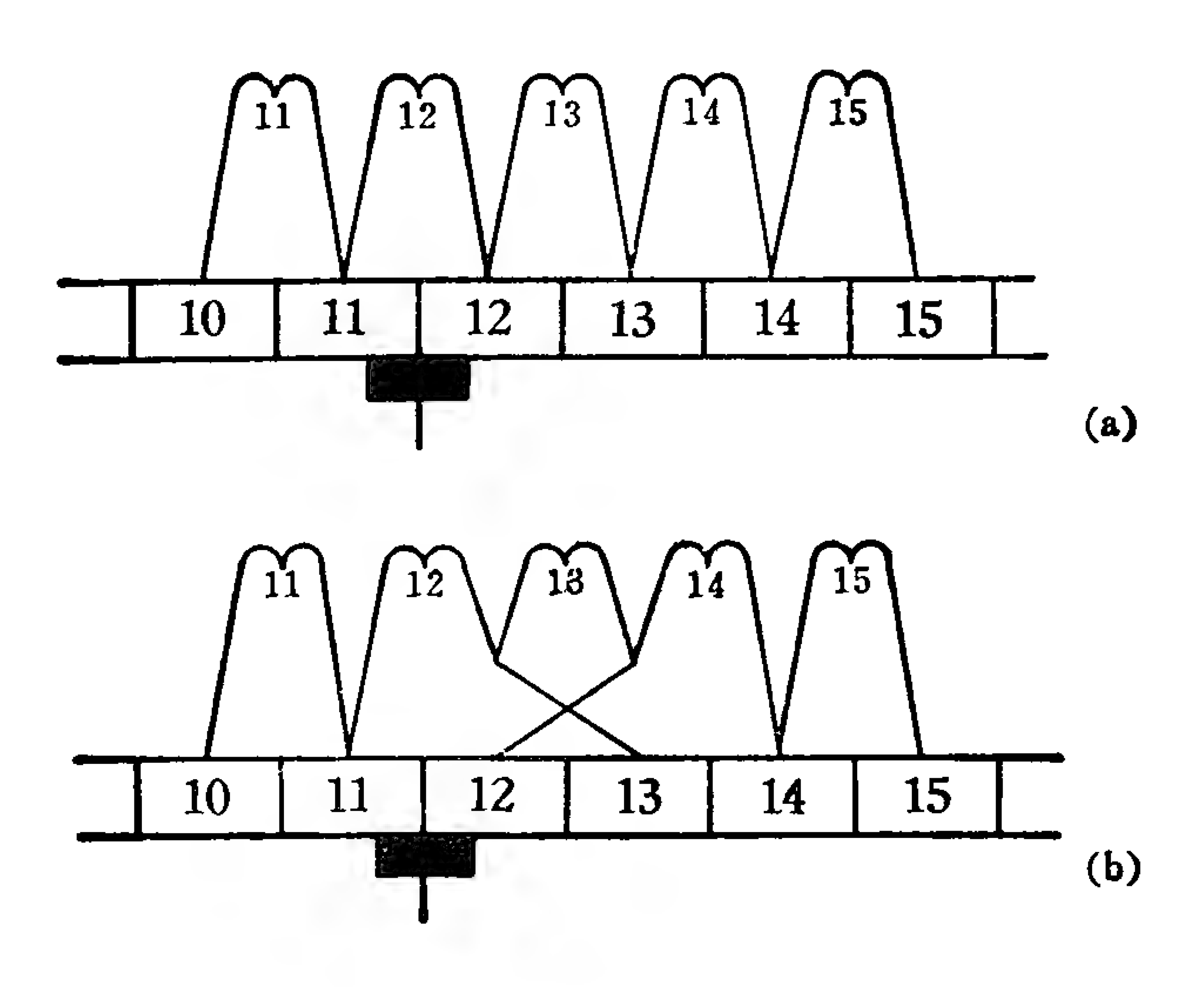


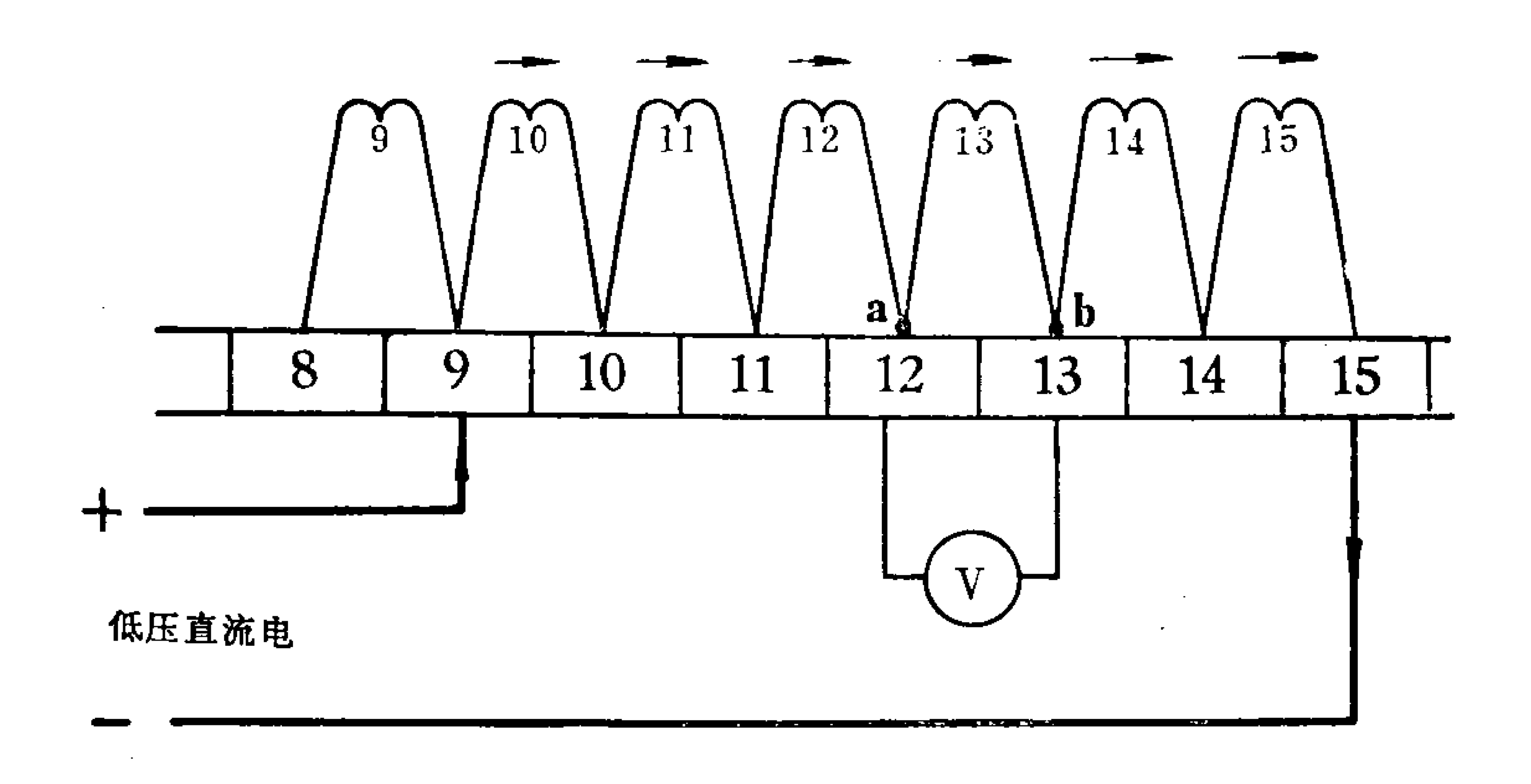
图 7 —19

那三种妨碍换向的电势——即电抗电势、电枢反应电势及变压器电势——便显著地增大，因此换向情况恶化，容易产生火花。

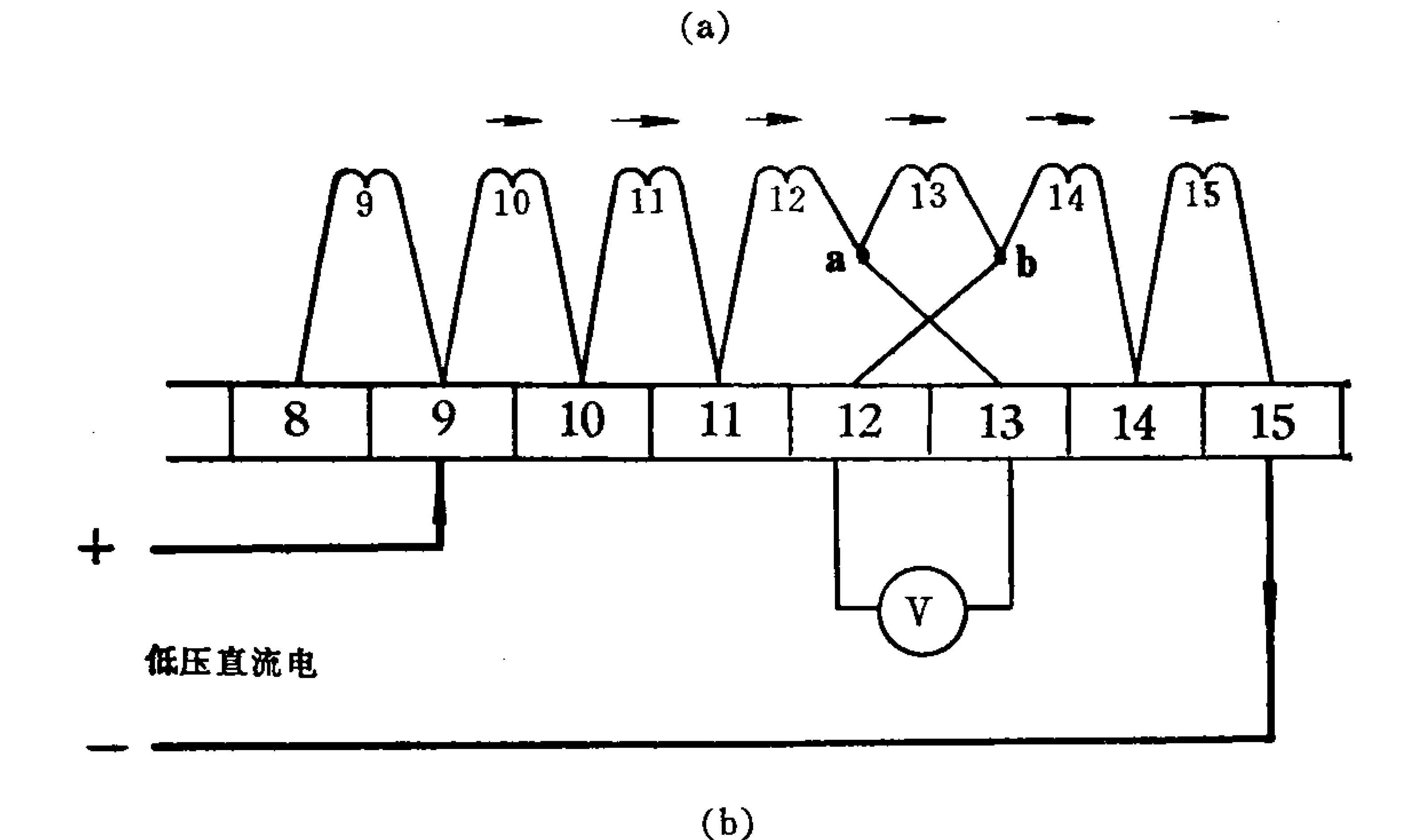
从上面的分析可以看出，不论是那一种情况，对电机性能都是不利的。因此，转子绕组重绕以后，首先要进行一些简单的检查试验，以判断元件是否接反或焊头位置是否错误，然后才能进行其他试验。下面我们首先分析判断焊头位置正确与否的方法。

一、检查片间电压以判断焊头位置是否正确

具体的办法如图7—20所示，将一个低压直流电源通入电枢绕组中，用一个电压表依次测量每两个换向器片之间的电压。当测量到焊头错误的两个换向器片时〔图7—20(b)中换向器片12和13〕，电压表指示反向读数。当电压表接到反向元件前面〔图7—20(b)中换向器片11和12〕或后面〔图7—20(b)中换向器片13和14〕时，则电压表指示出双倍读数。而其他接线正确元件所对应的换向器片，它们的片间电压都是正常读数。具体的理由可以通过图7—20来解释。当低压直流电源通入电枢绕组，每个元件中都有电流，每个元件上都要产生电压降落，在图7—20中，每个元件上的小箭头就表示了每个元件中电流的方向，也就是表示了其中电压降落的方向。按照电工上的一般习惯，当用箭头表示电压降落时，箭头尾端对应的电压高，箭头首端对应的电压低，尾端对应于着“+”极性，首端对应着“-”极性。由于在这种情况下，反接元件中的电流方向不变，所以不论焊头位置是否错误〔图7—20(a)和(b)〕元件上的箭头都指向同一方向，都是a点电压高于b点电压，所以与a点联接的换向器片电压总是高于与



(a)



(b)

图 7 —20

b点联接的换向器片电压。因此在接线正确时〔图 7 —20(a)〕，是换向器片12 的电压高于换向器片 13。而在接线错误时〔图 7 —20(b)〕，情况正好相反，是换向器13的电压高于换向器

片12。由于接线错误时，换向器片12与13之间电压反向，电压表自然也就是反向读数了。此外从图 7—20(b) 又可以看出，在换向器片11和12之间，串联了两个元件，而且这两个元件上电压降落的方向又一致，因此在换向器片11和12之间，电压表测出来的是两个元件上的电压降落，所以电压表上指示出来的就是双倍读数。

二、测量片间电阻以判断焊头位置是否正确

如图 7—21所示，用一电阻计分别测量两个换向器片之间的电阻，如果焊头没有错误，例如图 7—21 中元件10，则两个换向器片之间只联接一个元件，电阻计测量到的基本上是一个元件的电阻。如果焊头位置错误，例如图 7—21 中换向器片12和13，换向片12、13之间仍然只联接一个元件，电阻计上测量到的仍然基本上是一个元件的电阻。但焊头位置发生错误的前面或后面一对换向器片，例如图 7—21 中的换向器片11—12或13—14，它们之间串联了两个元件，此时电阻计上测量到的接近两个元件的电阻，电阻计上便指示出来双倍读数。根据上面分析，利用电阻计测量片间电阻也能发现焊头错误的故障。

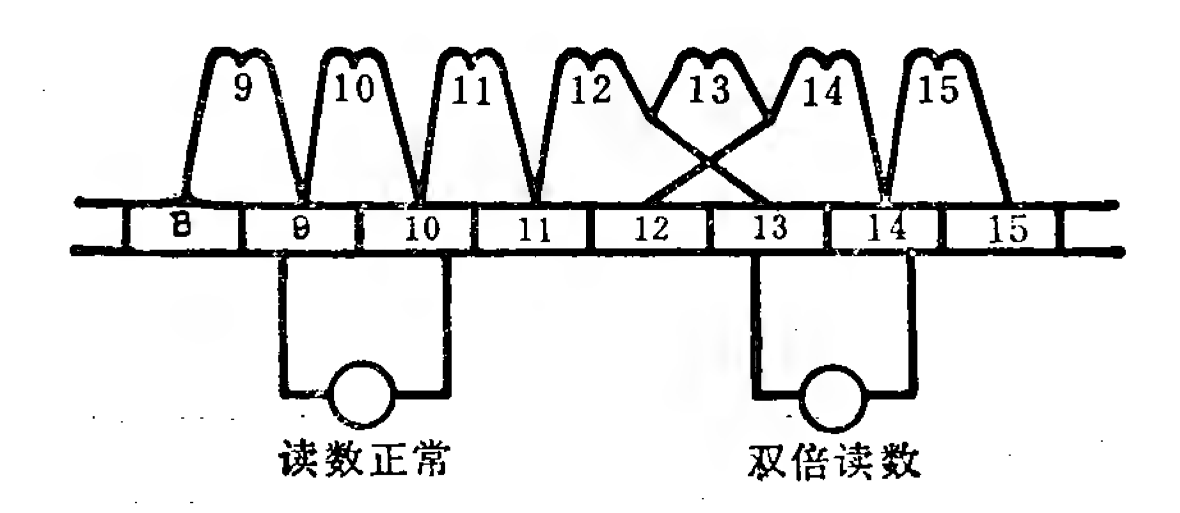


图7—21

三、元件反接故障的检测

虽然元件反接与焊头位置错误都是元件到换向器片的接线不正确所引起的，而且焊头位置错误也会引起元件反接（图7—18中元件13），但是两种故障的测量方法却不一样。用检查片间电压法可以测量出元件到换向器片的焊头错误这一故障（图7—18中元件12、13、14），但却测量不出元件反接这一种故障（图7—18中元件2）。理由解释如下。图7—22(a)和(b)分别表示元件2正确接法和错误接法两种情况。由于当元件2反接时，元件2中电流方向相反，其中电压降落的方向也相反，所以在图7—22(b)中元件2上的箭头方向也反过来了。如前所述，当用箭头表示电压降落时，箭头尾端对应的电压高，箭头首端对应的电压低，在图7—22(a)中，接线正确时，换向器1对应于箭头的尾端，电压高，而换向器片2对应于箭头的首端，电压低。也就是说，当接线正确时，是换向器片1的电压高于换向器片2。在图7—22(b)中当接线错误时，换向器片1也是对应于箭头的尾端，电压高，换向器片2也是对应于箭头的首端，电压低。也就是说，当接线错误时，也是换向器片1的电压高于换向器片2，这个情况与接线正确时完全一样。所以当用电压表去测量换向器片1与2之间的电压时，不论元件接线正确与否，电压表都指示正向读数。

要想测量出图7—22(b)所表示的这种反接情况，必须采用下面介绍的指南针法或条形磁铁法。

在用指南针检查元件反接故障时，应在元件已按照头接尾的规律全部串联起来，但尚未焊到换向器片上之前进行。每个元件分别通入低压直流电源，用指南针分别测量每个元

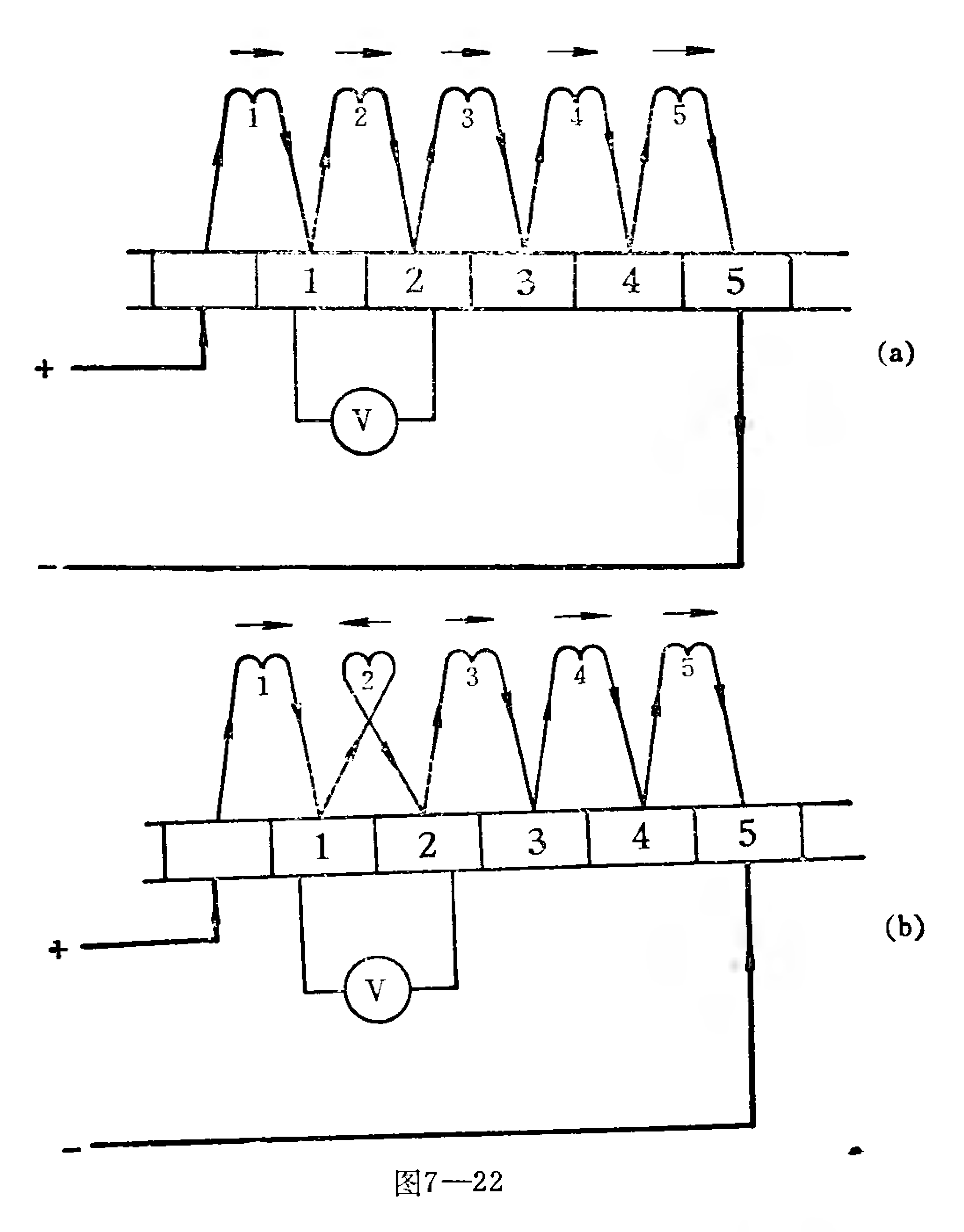


图7—22

件的磁场极性，当测量到接反的那只元件时，指南针会向相反的方向转动。其中的道理可以通过图7—23来解释。图7—23(a)表示元件正确联接时情况，在元件 2 的两个端点 a 和b上通入直流电流时，电流在元件 2 中为顺时针方向流动，根据右手定则，产生方向为流入纸面的磁通⊕。图7—23(b)表

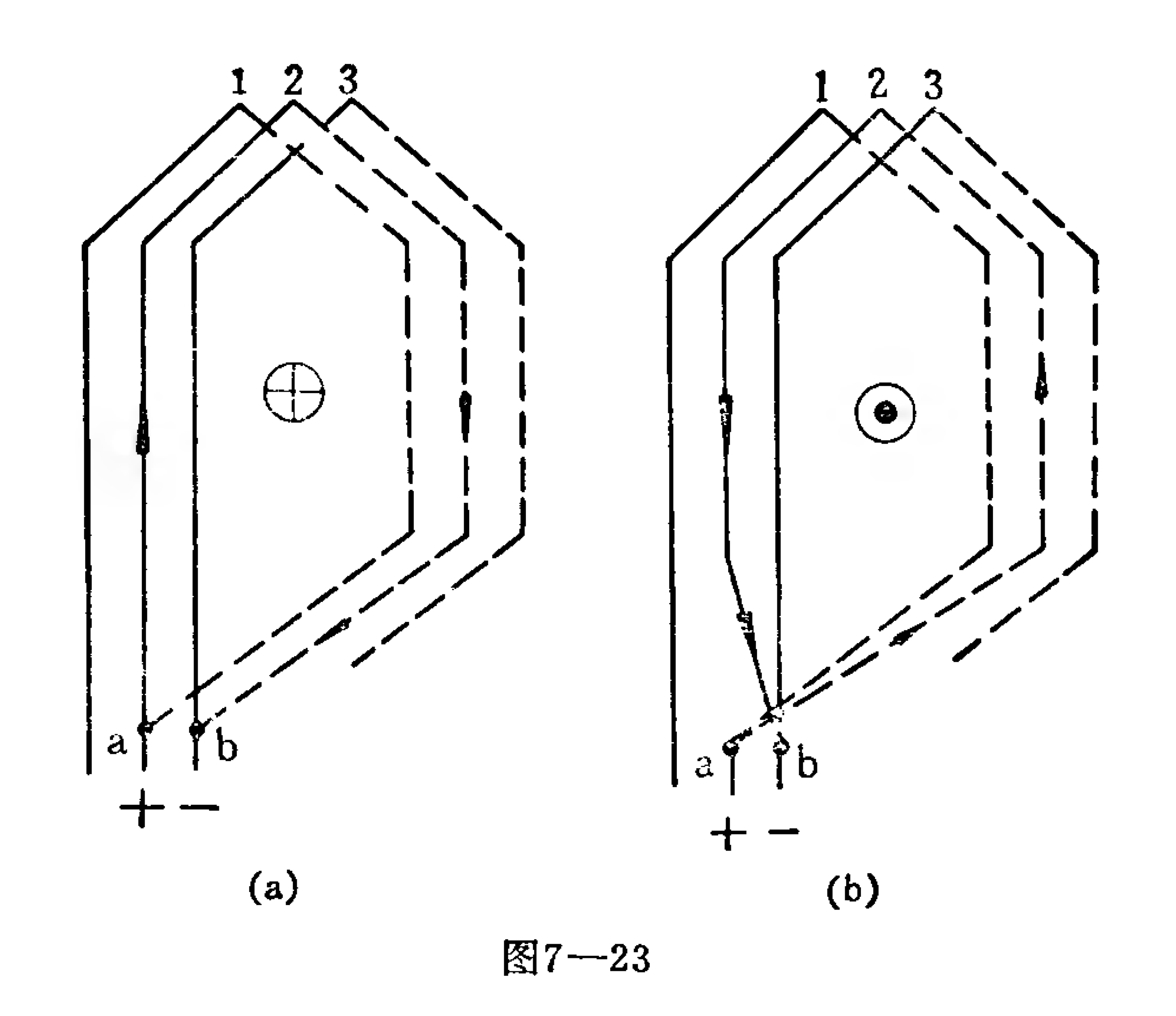


图7—23

示元件 2 反接时情况，此时在元件 2 的两个端点 a 和 b 上通入直流电流时，电流在元件 2 中为逆时针方向流动，根据右手定则便产生方向为流出纸面的磁通⊙。由于图 7—23(b)中元件 2 所产生的磁场极性与图7—23(a)相反，所以当指南针测量到这只反接元件的磁场时，指针会向相反的方向转动。

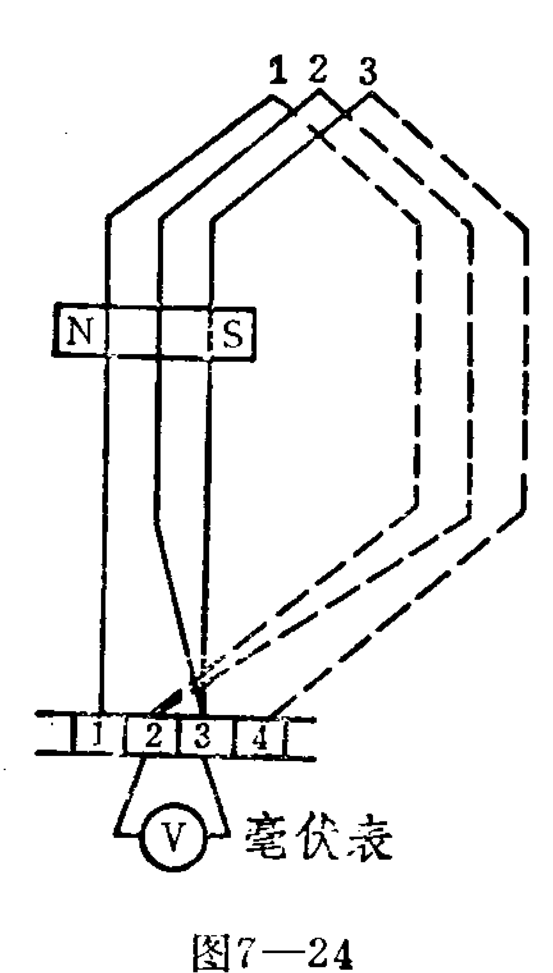


图7—24

检查反接元件的另一种方法是利用磁铁在槽口移动，如图7—24所示。由于磁铁的磁力线切割元件，每一个元件内都将产生感应电势，若用一毫伏表接在与反接元件相联的两个换向

器片上，则电表指针是反向读数，而其他都是正方向读数。

7—6　定子绕组故障的检修

定子绕组处于静止状态，因此，它出现故障的可能性比转子要少。定子绕组的故障也可分为：开路、短路、通地、反接几种，分述如下：

一、定子绕组开路

定子绕组产生开路的可能性有下面三种：(1) 引出线拉断或脱焊，这是造成定子绕组开路最常见的原因。(2)定子绕组的一端与转子上的风叶靠得很近，如果装配时不小心，转子上的风叶便可能与定子绕组相碰，转子旋转时，风叶便可能擦断定子绕组而造成开路。(3)当定子绕组短路或接地时，部分定子绕组电流剧增，使绕圈烧断形成开路。

由于现在我们研究的是串激电动机，定子绕组开路以后，整个电路就断开了，合上电源以后，没有电流，电机也就不能起动。

如果定子绕组开路只是由于引线拉断或脱焊，从绕组的外观就能看出。或者用手拉动引线，也能感觉出来。如果引线并未拉断，则开路点可能发生在绕组内部，此时可将定子绕组与电枢间的连接线拆开，用万用表的电阻档来检查每个绕组是否通路。也可用试灯来检查绕组的断路与否(图7—25)。如果灯泡发光，表示这个线圈是好的，如果灯泡不亮，那就是这个绕组里面断线了。

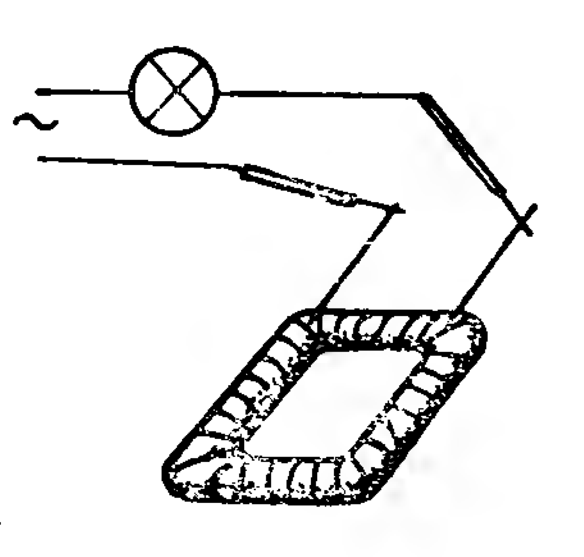


图7—25

在修理定子绕组时，应先将定子铁心放入烘箱内加热，使线圈受热变软，然后将线圈从磁极上取下。根据损坏情况，有下面三种修理方法：（1）如果是引线拉断，设法将断头处重新焊接起来就行了。（2）如果整个线圈并未烧毁，仅线圈的外层断掉几匝，可将这几匝断线拆除，用同样的导线补绕几匝即可。（3）如果整个线圈已经烧毁，或断头点在线圈内部，无法进行局部修理，那只好按照7—10节的方法，重新绕制定子线圈。

二、定子绕组短路

定子绕组产生短路的原因大致有：（1）引出线相碰使整个线圈短路。（2）导线外面的漆膜破裂引起匝间短路。（3）绕组受潮后绝缘性能降低而引起短路。定子绕组发生短路后，绕组的磁势减少，产生的磁通少，因而使转速升高，而且很快发热冒烟并发出焦臭味。

短路故障从线圈的外观就能看出，绝缘烧焦的地方就是短路故障所在处。如果外观看不出来，可以分别测量两个线圈的电阻。正常情况下，两个线圈匝数一样多，电阻应该一样大。如果其中的一个线圈中有短路，那总的串联匝数就少了，电阻也就小下来。因此，如果测量出这两个线圈的电阻相差很多，就说明电阻小的这个线圈中有短路故障。

找到短路故障以后，可以根据具体情况进行修理，绝缘物破裂的应把它重新绝缘。受潮的把它烘干就是了。如果短路情况严重，线圈业已烧毁，那只有重绕新线圈了。

三、定子绕组通地

如果定子绕组长时间受高热，使绝缘物焦脆而开裂脱落；或者经过重绕后装进磁极时，由于操作上的疏忽，使外

包绝缘擦破；或者电机长期受潮，使绝缘性能下降，以致绕组绝缘被击穿；这些都可造成通地故障。

检查通地故障时，可用一个串接着灯泡的交流电源（即试灯），一端接触在铁心上，另一端和绕组的引线端接触。如果灯泡发光，表示绕组和铁心间已形成通路，即绕组中存在着通地故障。此时，可将两个线圈之间的联线拆开，用上述方法分别检查每一个线圈，以找到通地故障的所在处。

找出通地线圈后，可以根据损坏程度的不同进行修理。轻微的只要将通地处重新用绝缘物垫隔开就行了。如果外包的绝缘材料损坏严重，但线圈还是完好的，可将线圈从磁极上取下，重新包缠绝缘，然后进行浸渍烘干处理。如果线圈本身已经损坏，那就需要重新绕制了。

四、磁极绕组反接

从工作原理图〔图1—1(a)〕可以看出，磁极绕组的正确接法应使这两个磁极一个为N极，一个为S极。例如在图7—26(a)中，下面一个为N极，上面一个为S极。如果将图7—26(a)中下面一个磁极绕组的两个线头对调一下，便得到

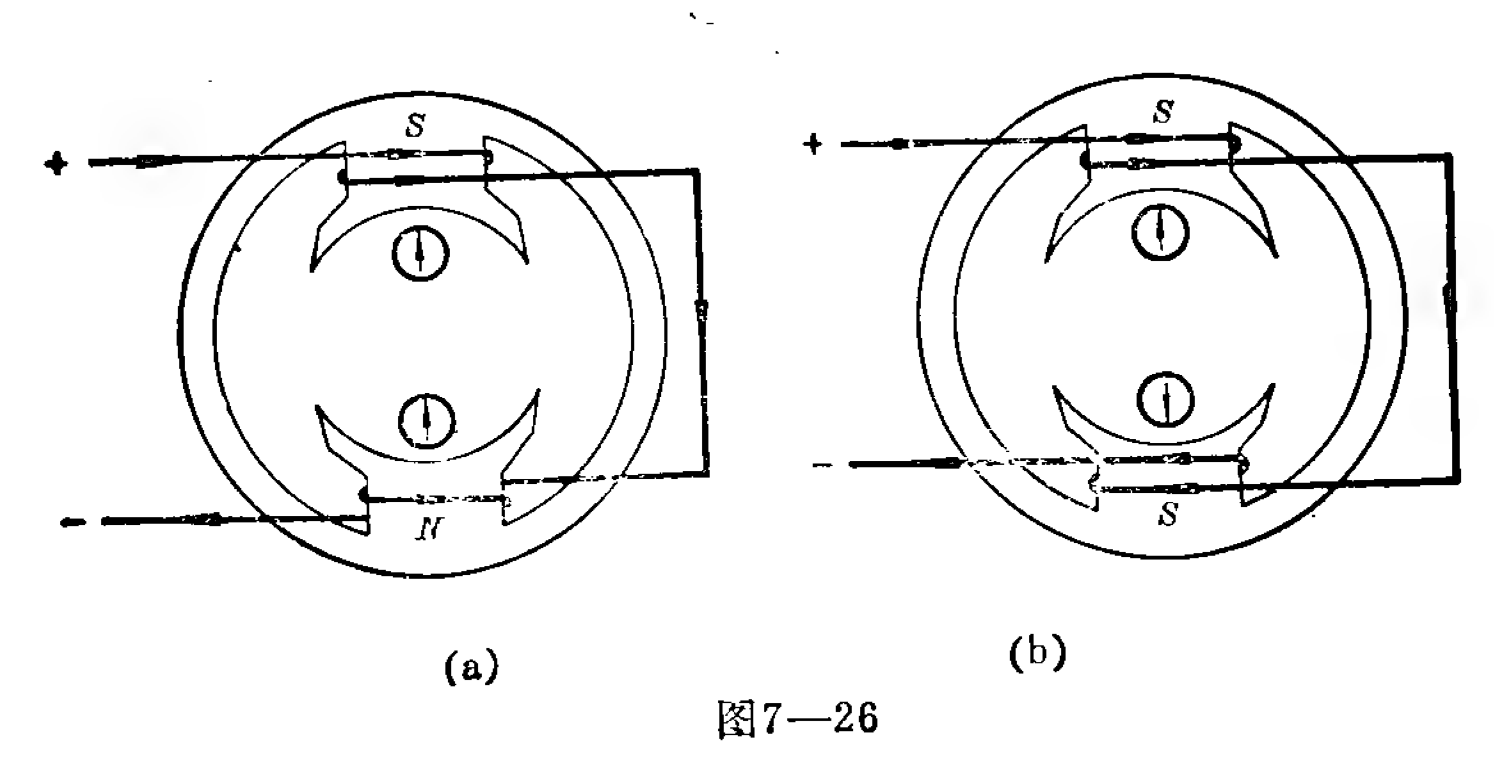


图7—26

图7—26(b)，此时由于下面一个磁极绕组反接的缘故，使得两个磁极都是S极了。两个磁极都是S极，那两个磁极下产生的电磁转矩是相反的，电机也就转不起来了。因此要使电机能正常工作，两个磁极绕组之间的接法一定要正确。

判断绕组之间联接是否正确最简单的办法是指南针法。将指南针放入定子内腔，由于N、S互相吸引的关系，在图7—26（a)中，当指南针靠近下面一个磁极N时，必是指针的S端指向磁极，当指南针靠近上面一个磁极S时，必是指针的N极指向磁极。在图7—26（b）中，由于两个磁极都是S极，不论指南针靠近上面还是下面一个磁极，都是指针的N端指向磁极。如果没有指南针也可用线悬吊一个小铁棒放在磁极之间来试验，当接线正确时，小铁棒能稳定的停留在磁极轴线上（图7—27）。这是因为当接线正确时，下面一个磁极为N极，上面一个磁极为S极，当小铁棒放到两个磁极之间以后，小铁棒的下端感应出一个S极，小铁棒的上端感应出一个N极，磁极与铁棒之间，由于N、S互相吸引的结果，使小铁棒稳定地停留在磁极轴线上。如果小铁棒不能稳定地停留在两个磁极的轴线上，就说明磁极绕组接反了。

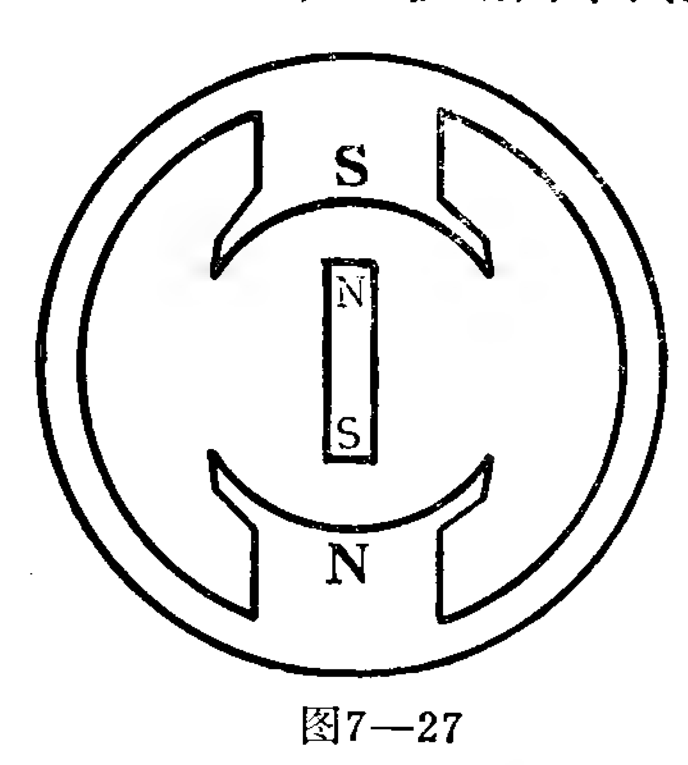


图7—27

7—7 换向器的检修与拆换

换向器式电机运行的可靠性在很大程度上取决于换向器

和电刷的质量，它们性能的优劣，对整个电机有很大影响，因此，对它们应加强维护。

对换向器的要求是表面光洁圆正，不能有局部变形。当换向器表面有灼伤或毛刺，以及外圆偏心或云母片突出时，电刷就不能在换向器上平稳滑动，容易产生火花。如果换向器表面沾有油垢污物，也会使电刷与换向器接触不良而产生火花。

当换向器表面有油垢污物时，应用沾有少量酒精的抹布将其擦净。当换向器表面粗糙或有毛刺时，应在电机转动情况下用细砂纸研磨换向器表面。当换向器表面不规则严重时，那就必须重车换向器的外圆了。

换向器经常出现的故障有：

一、换向器通地

通地经常发生在前面的云母环上，因为这个环有一部分是暴露在外面的，由于油污和其他碎屑杂物堆积在上面，很容易造成漏电故障，严重时烧毁绝缘。发生这种故障时，这部分的云母，大都已经烧毁，因此寻找起来比较容易，从外观即可察觉出来，也可以用摇表及试灯进行检查。

二、换向器片间短路

造成换向器片间短路的原因有：（1）换向器片之间的云母被击穿、腐蚀、破裂、或被漏油浸透。（2）换向器片之间的小槽中堆积了铜屑炭末等杂质。（3）换向器片上的焊锡受热熔化后流入到两换向器片之间。上述这些原因都会造成换向器片间短路。片间短路故障的检查可以采用7—3节所介绍的方法来进行。

找到短路故障以后，可用图7—28所表示的刮削工具把堆积在两片之间的杂质或焦黑的云母刮去，直到看见好的白

色云母为止。再用7—3节所介绍的方法检查一下片间短路是否消除。如果短路故障已经修复，然后再用换向器胶把空洞填补起来。等它干了以后，再检查一下是否已经修好，最后研磨换向器表面使其光滑。换向器通地故障也可以用类似方法进行修理。近来也倾向于用磷酸及氧化铜粉末调和成黑色浆糊状的无机粘接剂来填补换向器，经24小时左右即可干燥使用。

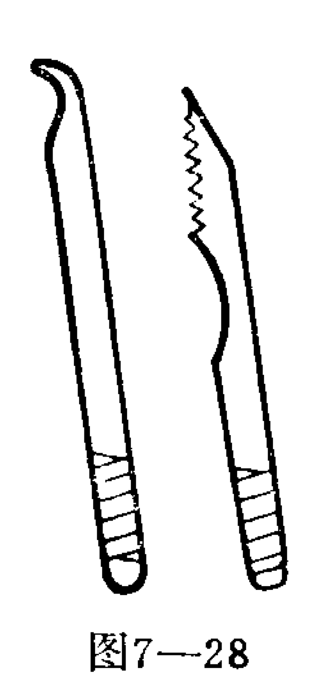


图7—28

假如只有一处短路，用上述方法修补又比较麻烦，也可采用下面的简易修理方法。就是把元件的两个线头从某一短路的换向器片上拆下，并把这两个线头焊在一起，用绝缘包扎好，然后再把短路的两换向器片用一根导线焊联在一起，具体方法如图7—29所示。这种修理方法虽然简单易行，但对电机的换向却产生了不利的影响，具体的理由可以通过图7—30来解释。图7—30是图7—29的简化，两个图

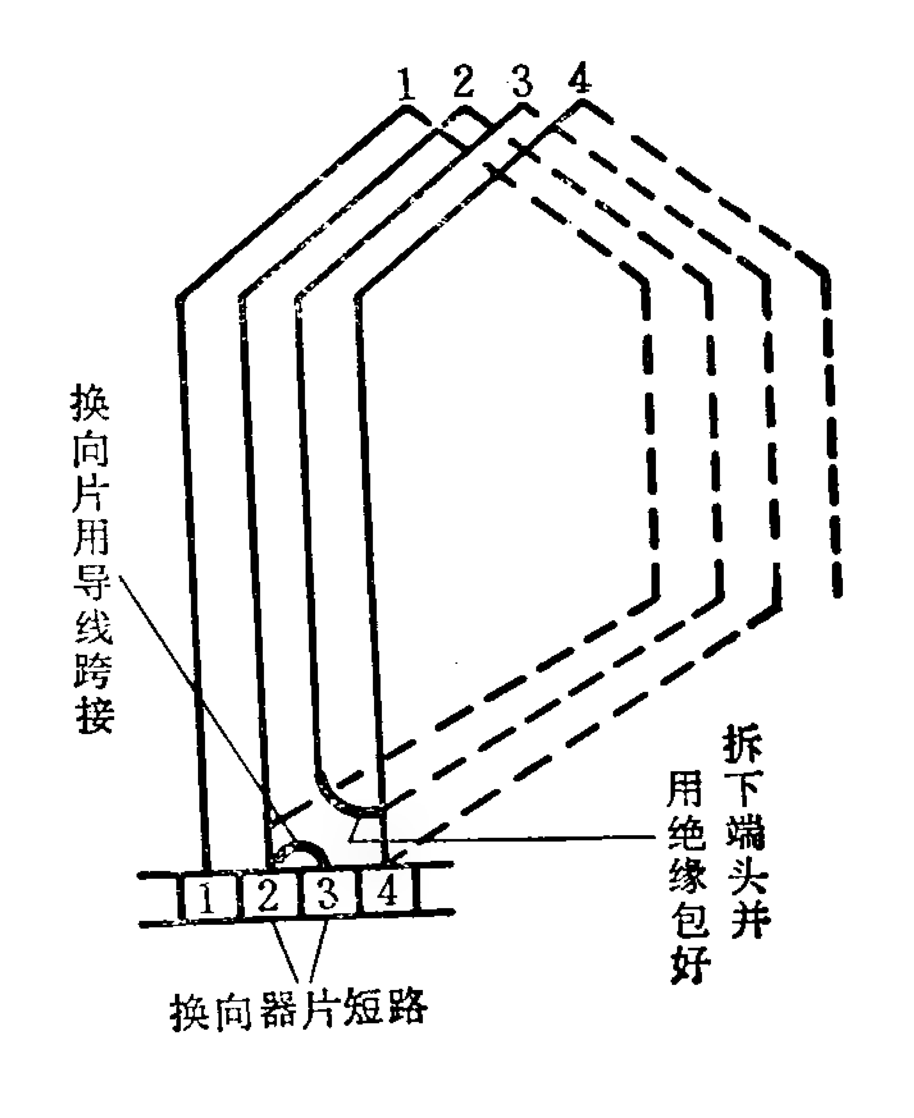


图7—29

形所表示的内容是一样的，在这两个图形中，都是元件2与3之间的联接线从换向器片3上拆下，都是将换向器片2、3之间用跨接线联接起来。从图7—30可以看出，采用这种修理方法以后，电刷同时短路了元件2与3，

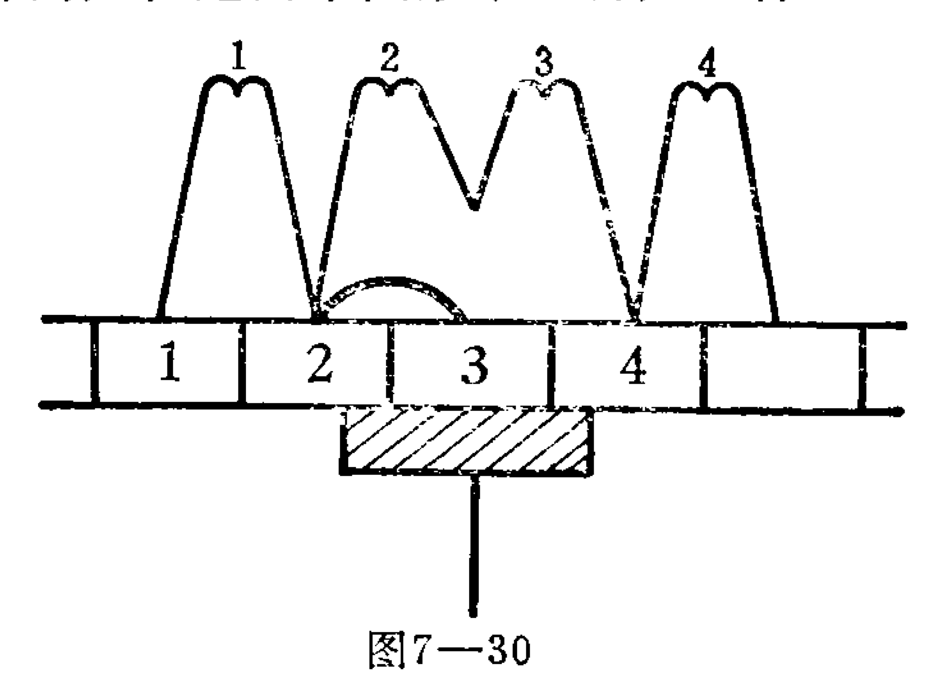


图7—30

或者说元件2与3串联起来以后进行换向，匝数多了一倍，因此电抗电势、电枢反应电势及变压器电势也会显著增大，这对换向过程极为不利，容易出现火花。因此，如果电机原来运行情况不太理想，火花已经比较大，则不宜采用这种修理方法。

三、换向器片凹凸不平

发生这种故障的主要原因是装配不良或过分受热，从而使整个换向器松弛；或者受了严重撞击，使换向器片产生位移。由于换向器片凸凹不平，运行时电刷与换向器之间会产生噪杂声响，同时发生火花。电枢静止时，用手摸一下换向器表面，也能查觉到这种故障的存在。修理时可将端环松一下，设法将凹凸的换向器片放平。如果无法将凹凸的换向器片放平，那只有在车床上将换向器车圆了。换向器车圆以后，应用图7—28所示的

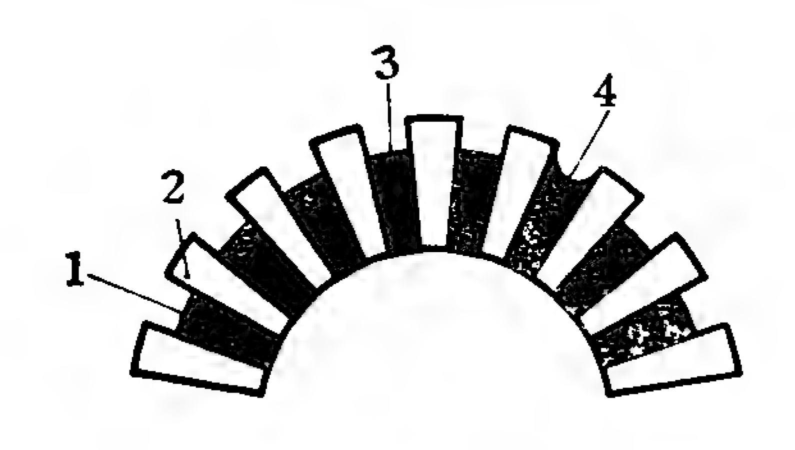


图7—31

1—云母片　　2—换向器片

3—正确下割　　4—不正确下割

刮削工具，将云母片割削到比换向器片低约0.5—1毫米左右。下割的主要目的是：避免换向器片之间因金属微粒的粘连而形成短路。同时云母下割之后，可使其在运转时不与电刷相接触。云母的硬度是比较大的，割槽以后，云母不与电刷相接触，电刷的磨损情况会改善一些。但下割的深度不宜太大，下割过深易在片间堆积碳粉，造成片间短路。云母片下割以后，再用细砂纸研磨换向器外圆，使其表面光滑无毛刺。

在下割云母时，一定要注意，云母片一定要刮削得平整，不要使两边高中间低，形成如图7—31所表示的形状。因为两边凸出的云母片边缘仍然可以和电刷相磨擦，使电刷易于磨损。

四、换向器的拆换

近来小型串激电动机倾向采用塑料换向器，这种换向器损坏之后不易修复，在这种情况下，可考虑拆换整个换向器。即用一个直径与长度相差不大的换向器车削到所要求的尺寸，来替换原有的已损坏的换向器。两个换向器的片数可能不一样，可能多一片也可能少一片，此时可用调整元件数及匝数的方法弥补。我们举一个具体的例子来说明。如果一台电机换向器片数是24，每个元件匝数是30。由于元件数等于换向器片数，所以这个电机就有24个元件。如果用一个有25个换向片的换向器来代替，则这个电机就应有25个元件，此时可将某一个槽中多放一个元件。原来这个槽中放两个元件时，每个元件是30匝。放3个元件以后，每个元件调整到20匝，这样总匝数不变，电机的性能不会受到太大影响。

7—8 电　刷

如果同一般直流电机相比较，单相串激电动机的电刷磨损较快，这是因为：

1.单相串激电动机转速较高，G系列单相串激电动机转速为4000—12000转/分。而新系列电动工具用串激电动机的转速为9900—14300转/分，转速高当然电刷的磨损就比较快。

2.如前所述，电刷和换向器之间形成的微小电弧是造成电刷磨损的原因之一。单相串激电动机的换向情况较一般电机恶劣，火花是经常产生的，因而也使电刷磨损比较快。

3.换向片间的云母有割槽与不割槽之分。所谓割槽就是将换向器片间的云母下割一些（图7—31）。下割的目的在7—7节中已进行了简要的介绍。但云母下割的电机运转时噪音较大，若要求低噪音运转，则云母不应下割。由于云母比较硬，此时电刷的磨损程度便会加重。如果为了经得起云母的磨损，选用硬质电刷，电刷的磨损可以减轻，但换向器表面的磨损却加重了。

正常情况下，在高转速的串激电动机中，使用600—800小时以后，才须要更换电刷。如果电刷磨损的速率过快，那就是异常磨损。异常磨损又可分为两种情况：一种是电刷发生显著地均匀磨损，另一种是整个电刷平均磨损并不见得那样大，但局部发生异常磨损。当发生异常磨损时，不外从两个方面寻找原因，其一是机械上的原因，如电刷跳动剧烈，或者磨擦系数过大，或者压力过大，或者云母片突出等。其二是电气上的原因，这主要是由于换向不良，由火花电弧而引

起的电气磨损。此外，电刷材料的硬度及质量不均匀也是引起局部异常磨损的原因之一。电刷磨损比较快会带来下面一些不利的后果。

1.电刷磨短以后，弹簧的压力不够，不能使电刷与换向器很好的接触，运行时容易产生火花。

2.在电刷磨损的同时，向周围空间散布大量的碳粉末。一般情况下，换向器的片间云母能承受住300—500伏片间电压，但如果沟内充满碳粉末,其耐压值便大量降低,即使片间电压很低，也会引起放电，产生电位差火花，甚至促进环火的形成。

因此，电刷磨损比较快，不能简单地看成只是需要更换电刷的问题，对电机运行也会带来不利的后果。当电刷磨损到一定程度时，就应该更换新电刷了。在更换新电刷时应注意下面几个问题：

1.在5—3节分析改善换向方法时，我们已经了解到，电刷的性能对换向过程的能否顺利进行，关系极为密切，每一种类型的电机都有其合适的电刷，换用另外型号的电刷往往会使换向情况恶化，出现火花。因此在更换电刷时，应尽可能选用原来牌号的电刷，以利换向过程的顺利进行。

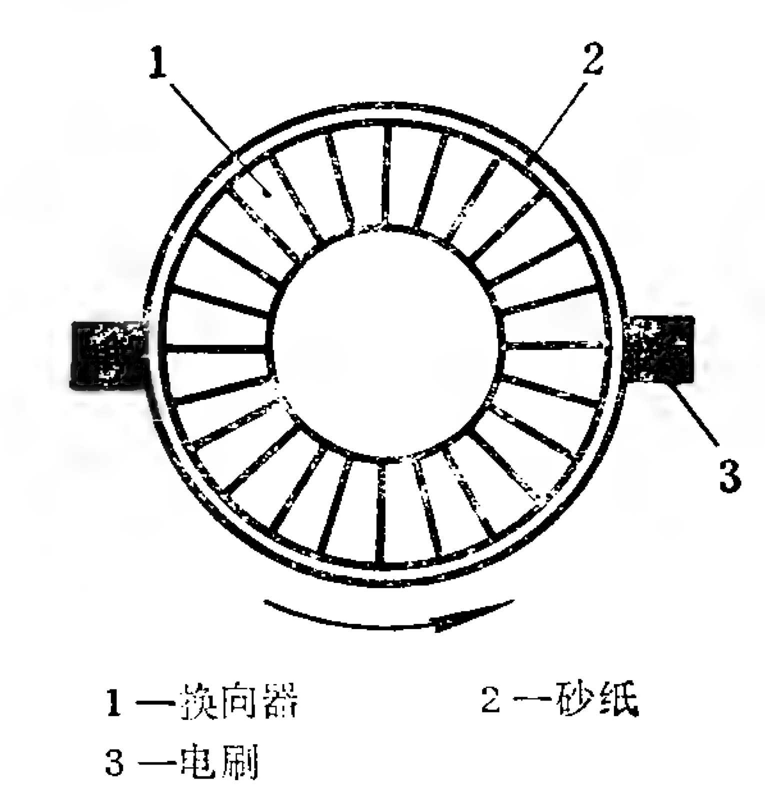
2.电刷的尺寸不可过大过小，电刷的安装不可过紧或过松，一定要合适，既使电刷能在刷盒内自由上下活动，又要保证电刷能与换向器表面密切接触。

3.在制做新电刷时，一定要在电刷后面钻一个1.2—1.5毫米的小孔，深度约为电刷高度的一半，用一段铜丝辫插入，再用铜粉塞入小孔，使铜丝辫装的很牢。铜丝辫套入弹簧后，在它的另一端焊上一块小铜片，它比刷座盖内面积略

小一些。通电以后，利用铜丝辫来传导电流，而不要利用弹簧来传导电流。因为如果电流依靠弹簧来传导，弹簧受热后容易失去弹性，使得电刷与换向器之间压力减少。

4.电刷更换后，一定要用“00”号细砂纸按旋转方向打磨，具体方法如图7—32所示。将砂纸包裹在换向器表面上，并用胶布将其贴牢，然后按照转子工作时的旋转方向转动换向器，使砂纸研磨电刷。磨好后，吹净换向器表面，并使电机空载运行一段时间，使电刷与换向器的接触面积达到75%左右。

5.选用的弹簧粗细一定要适当，使电刷在换向器上保持一定的压力。压力过大会增加电刷与换向器之间的磨损，破坏换向器表面的那层氧化亚铜薄膜，使换向情况变坏。压力过小，会使电刷与换向器之间接触不稳定，电刷容易跳动，因而产生火花。对于一般的串激电动机，要求保持电刷压力在200—400克/厘米²之间，而电动工具用串激电动机则要求保持电刷压力在300—500克/厘米²之间。



1—换向器　　2—砂纸

3—电刷

图7—32

7—9　转子绕组重新绕制

在下列情况下，转子绕组必须重新绕制：

1.原绕组损坏情况非常严重，无法进行局部修理。

2.电机需要改变原来的性能，例如改变电机的电压或转速，等。

3.原绕组早已拆除，只剩下定、转子铁心。

对于第2种、第3种情况，在重绕前，必须按照4—5、4—6、4—7、4—8节所介绍的方法，重新计算定、转子绕组的匝数和线径。至于第一种情况，如果电机业已经过修理，拆出来的绕组匝数和线径是否正确有怀疑，最好也参照第四章的方法计算一次，以使绕组数据可靠，避免修理好以后，再出故障。

大修转子绕组一般按照下列步骤进行。

一、记录数据

在修理电机时，切忌盲目的拆除旧绕组。在拆除旧绕组时，要仔细地观察测量旧绕组，把它的有关数据记录下来，作为重新绕制或计算新绕组的根据。记录项目如表7—2所示。同时选定一个绕组元件，将它的二条边所嵌放的槽和所联接的换向器片的端部，用锉刀或冲子作一记号，如图7—33所示。这样，就记录了元件的节距以及元件到换向器片的焊头位置。为了便于分析性能及前后对比，应把计算数据及电磁负荷等一并记入表7—2中。

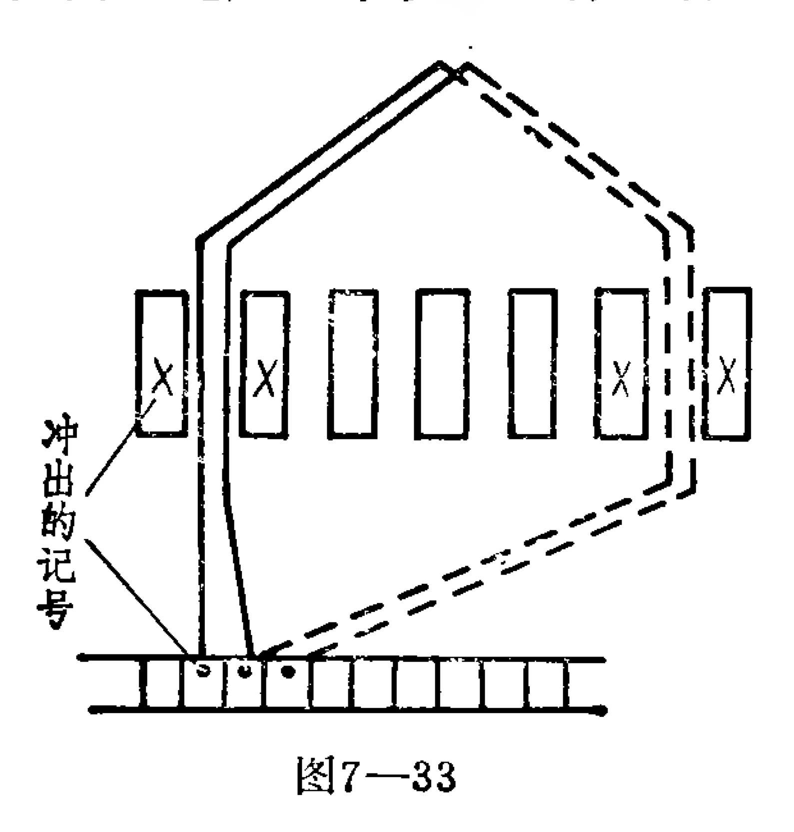


图7—33

表 7—2　　修理电机记录表

原制造厂　　　　　　　　　　　　　　年　　月　　日

型　号		电　压		电　流	
功　率		转　速		绝缘等级	
铁心和绕组数据					
定子内径		定子外径		铁心长度	
极弧长度		气隙长度		转子槽数	
换向器片数		每元件匝数		每槽线数	
实槽节距		转子线规		定子每极匝数	
定子线规					
改绕后的绕组计算数据					
转子元件匝数		每槽线数		转子线规	
实槽节距		定子每极匝数		定子线规	
电磁负荷					
气隙磁密		热负荷			
定子电密		转子电密			
槽形尺寸图		元件到换向片焊头位置示意图			

二、拆除旧绕组

绕组经过浸渍烘干以后，成为一个整体，非常坚固，要拆除它是不容易的。拆除旧绕组首先要使绝缘漆软化，软化绝缘漆的方法有下面两种：

一、通电加热法

首先用一根裸铜线把换向器全部捆扎起来，使换向器片全部短路，这样，转子绕组的每一个元件都短路了。然后把转子绕组放到图 7—34 所表示的开口变压器上（为了图形简单清晰，图 7—34 的转子绕组只画了一个线圈），将开口变压器的线圈中通入交流电流。开口变压器的铁心与转子铁心构成一个磁回路，磁通路径如图中虚线所示。开口变压器的线圈相当于变压器的初级，而转子绕组相当于变压器的次级。根据变压器的工作原理，当初级绕组通入交流电流时，会产生一个交变磁通，这个交变磁通在次级绕组中感应出一个电势，所以被短路的次级绕组中一定会产生一个很大的短路电流，利用这个短路电流，加热转子绕组，以使绝缘漆软化。如果没有开口变压器，也可以将电枢放在烘箱内加热，以使绝缘漆软化。

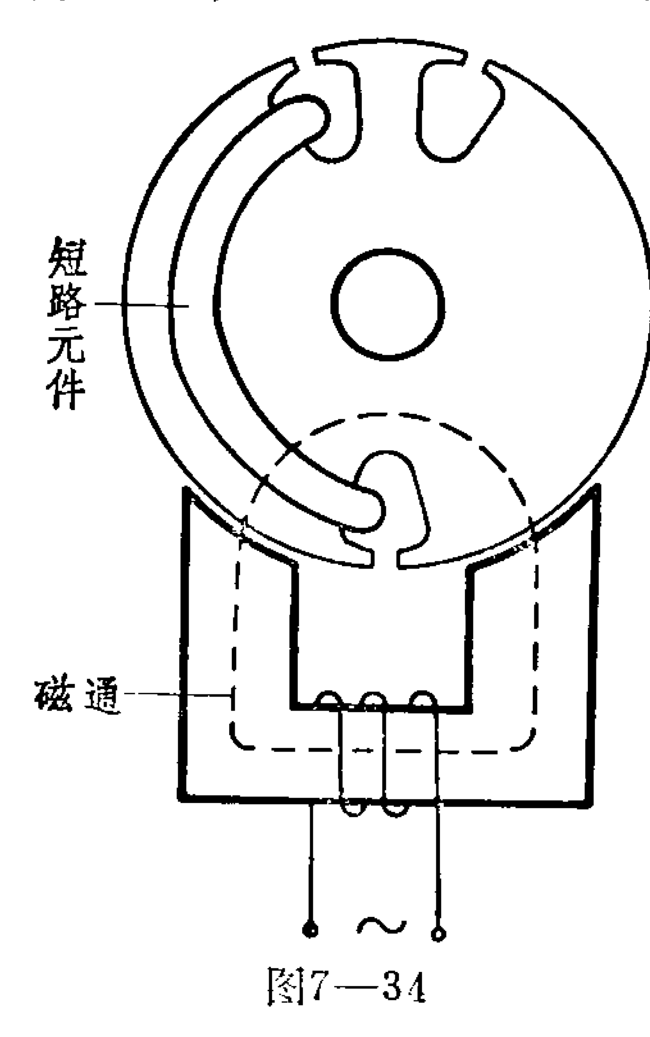


图7—34

二、溶剂溶解法

在绝缘漆尚未老化的情况下，可以用以下的溶剂浸泡。其成分是：丙酮25%，酒精20%，苯55%。将这些溶液按重量比例混合，把电机浸入溶剂内，待绝缘漆软化后，即可取出拆线。在使用溶剂浸泡时，注意切勿使换向器浸入溶剂内，以免换向器受到损坏。

溶剂溶解的另一种方法是刷浸法。其成分是：丙酮50%，

甲苯45%，石蜡5%。将石蜡加热溶化后，移开热源，先加入甲苯，然后加丙酮搅和。将电机放在有盖的铁盘内，用毛刷将溶液刷在绕组的两边端部和槽口上，然后加盖，防止溶剂挥发太快，等绝缘漆软化后，即可取出拆线。

注意：在使用溶剂时要防火，并在通风良好的地方使用，以防止苯的气体吸入人体中毒。

用上述方法使绝缘漆软化以后，即可参照下列步骤拆除旧绕组。

1.拨出全部槽楔。

2.拆除绕组端部扎线。

3.按照图7—33的方法，将某一元件两条边所嵌放的槽和所联接的换向器片端部，用锉刀或冲子作一记号。

4.将绕组的一端剪断，同时拉出线圈，将线圈匝数、导线直径、绕组节距等记录在表7—2中。

5.槽内绕组全部拆完后，将换向片上残留的线头用烙铁加热熔脱。

6.用一个磨成同导线直径一样厚度的薄锯条，清除换向片接线槽内的残余焊锡。

7.用薄锯条将附着在槽壁上的绝缘物清理干净。

8.检查转子铁心，如果有尖角、毛刺，或有凸出的硅钢片，必须用锉刀将其校正锉平，以免将来刺破绝缘，造成绕组通地。

9.用万用表、试灯或摇表检查每两个换向器片之间是否短路，以及每个换向器片与转轴之间是否通路。如果有片间短路及通地故障，应按照7—7节所介绍的方法，先修复换向器，然后才能绕制新绕组。

在按照上述步骤拆除旧绕组及清理铁心的过程中，应注意不要把铁心两端的绝缘板撬坏了，也不要碰伤换向器表面。

如果转子绕组原用环氧树脂浸渍，目前尚无较好办法使其软化，那只能用锯或锉等工具，把铜线锯断，逐一拆除。

新系列电动工具用串激电动机已采用双重绝缘结构，在6—4节我们已介绍过，多采用接轴或在铁心与轴之间注入一层保护性绝缘材料，做为转子的保护性绝缘。此时，不论采用何种方法拆除旧绕组，均不应使轴绝缘受到破坏，否则修好以后的电机已不是双重绝缘产品，同时轴与电枢及换向器表面的同心度也破坏了。

三、绕制新绕组

在修理单相串激电动机时，电枢绕组是关键性的一环，因此对电枢绕组的缠绕原理及制造工艺必须着重掌握。小型单相串激电动机的转子绕组有两种基本型式，即：迭绕式与对绕式，各有其优缺点，分述如下。

1. 迭绕式

绕制任何绕组，都得首先决定元件的节距〔图4—2(a)中y_1〕。如果照原绕组绕制，节距y_1当然是采用原来的数据。但在改变电压或改变转速的情况下，绕组的各项数据已与原来的不一样，此时节距y_1就必须重新决定了。在4—3节及5—3节中，我们已经介绍过，为了改善换向消除火花，同时又不要使电磁转矩减少过多，元件节距y_1的选取原则是：接近于全距的短距。如用公式来表示，那就是：

单数槽转子元件节距 $y_1=\frac{Z-1}{2}$（实槽） 7—1

双数槽转子元件节距 $y_1=\frac{Z}{2}-1$（实槽）　　7—2

式中：Z—转子槽数。从附表—1、附表—2、附表—3、附表—6、附表—7、附表—8及附表—10中所介绍的数据可以看出，除极个别的特例外，绝大多数电机以实槽表示的元件节距都符合式7—1及式7—2的计算结果。

下面我们以转子槽数 $Z=7$ 的电机为例，说明采用迭绕式时各元件之间的缠绕顺序。根据式7—1可知，元件的节距为：

$$y_1=\frac{Z-1}{2}=\frac{7-1}{2}=3\text{ 个实槽（即跨距是1—4槽）}$$

缠绕时左手握住电枢，右手拇指与食指捏住导线，如图7—35所示。将导线的起端留出一段缠紧在轴上，任选一槽

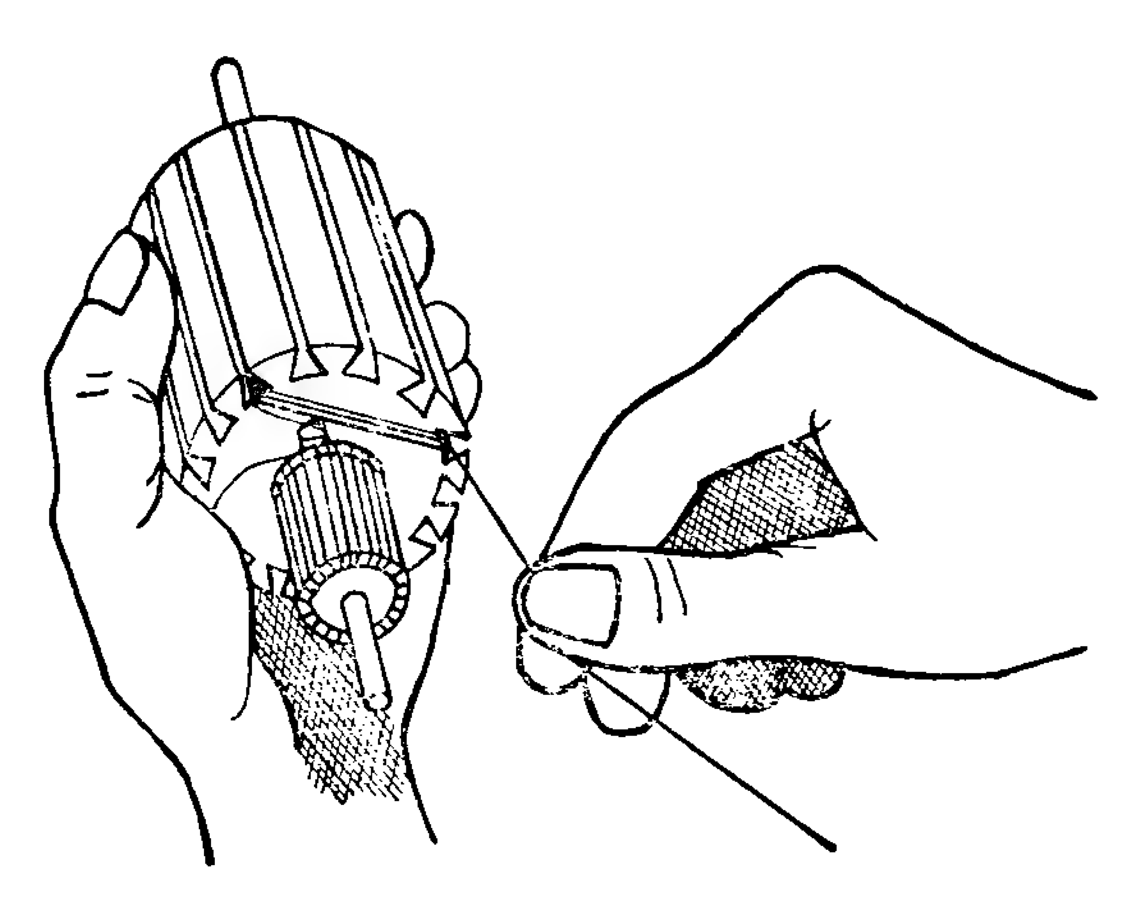


图7—35

称槽 1，由于元件跨距是 1 — 4 槽，所以在槽 1 与槽 4 内绕以所需的匝数，这就是第一个元件。如果在拆除旧绕组时，某一个元件所跨的两个槽已作了记号（图7—33），那么就应该从这两个槽开始绕线。为了使导线绕的紧密，在绕线时必须施以适当的拉力，力的大小以导线不变形为度。绕完第一个元件后，在第一个元件尾端与第二个元件首端扭一个线结，然后在槽 2 和槽 5 之间绕第二个元件。第二个元件绕好后，将第二个元件的尾端与第三个元件的首端扭一线结，然后在槽 3 和槽 6 之间绕第三个元件，如图 7—36 所示，依次进行，直到 7 个元件全部绕完为止。第 7 个元件的末端线头，和第一个元件的起端扭在一起，最后将所有线头上的绝缘漆除去，并将它们嵌入相应的换向片中（图7—33）。

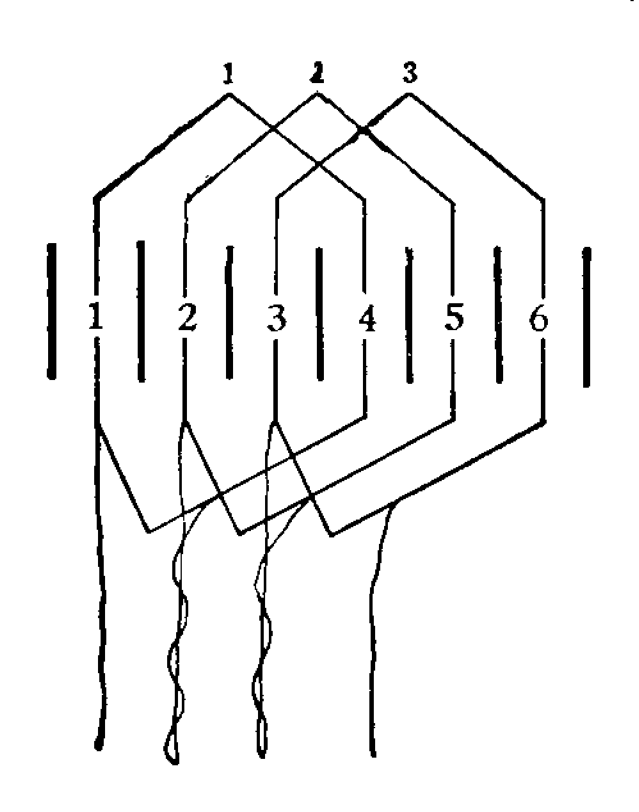


图7—36

以上所讨论的是转子槽数和换向器片数相等的情况，每个槽中每层只有一个元件边。但实际上，换向器片数总是槽数的两倍或三倍，在 4 — 1 节中我们已经谈到，元件数总是和换向器片数相等的。因此，元件数也总是槽数的两倍或三倍，所以每一个槽中总是有两个或三个元件并列。此时绕组的绕制方法和前面每槽一个元件的一样，所不同的是每个槽中有两个或三个抽头。以一个 7 槽14个换向器片的转子为例，其绕线程序如下：将第一个元件绕在槽 1 和槽 4 中，抽一个头扭成结后，将第二个元

件也绕在这两个槽中，再抽一个头扭成结，然后在槽 2 与槽 5 之间，用同样的方法绕第三个及第四个元件。这样继续下去，直到 7 个槽中的14个元件全部绕完为止。在绕下一个槽中的元件以前，总是要先绕好前一槽中的两个元件。一个槽中有两个元件并列，就有两个抽头。这两个抽头可以用不同的长度来区分，也可以套上不同颜色的套管来区分，以便将来按次序分别接到对应的换向器片上去。如果一个槽中有三个元件或更多的元件，也可以仿照同样方法进行绕制。

在绕制线圈的过程中，每绕好一个线圈就要将它的引线头移到槽口，并安放到图 7 —37所表示位置，然后再去绕制下面一个线圈。这样，等所有的线圈绕好以后，所有的引线头均位于槽口，并在绕组端部的外表面，这对于下面工序的进行，例如：将线头焊接到换向器片上，绑扎绕组端部，测试绕组接线是否正确，等等，都是有利的。

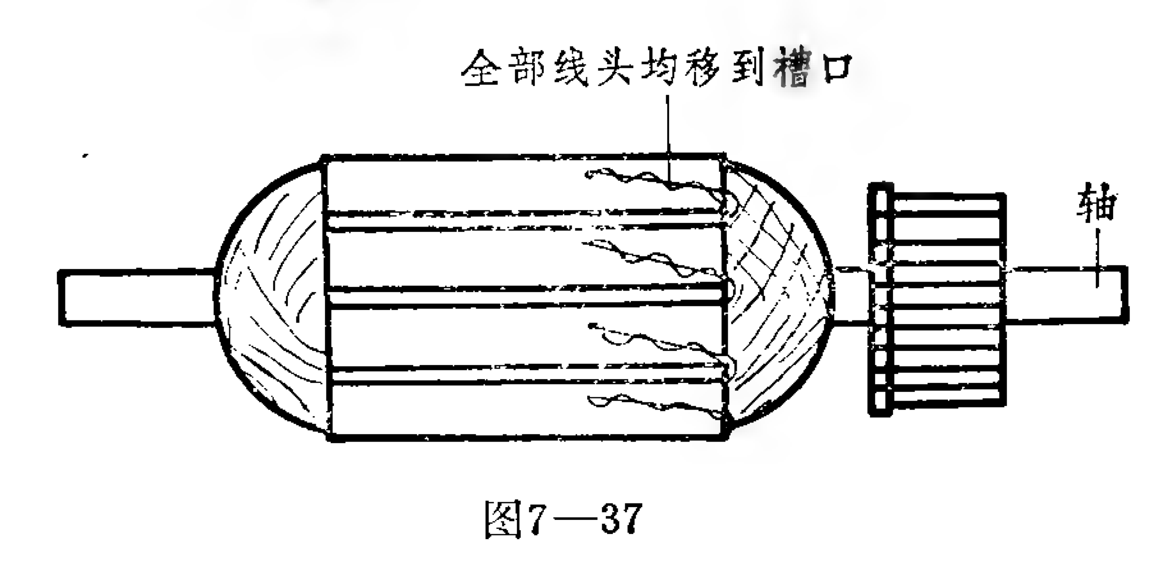


图7—37

迭绕式的优点是缠绕工艺简单，但生产经验告诉我们，这种绕组的端部重量不能均匀分布，如果动平衡未校好，电机运行时会产生振动。振动又会恶化电机的换向情况，容易产生火花；振动也会增大电机的噪音。在没有小型动平衡机的情况下，转子无法校正动平衡，这时应力求使转子绕组重

绕以后，端部重量能均匀分布，以免运行时电机振动。这就必须采用下面所要介绍的对绕式了。

2. 对绕式

为了说清楚对绕式的绕制工艺及特点，必须首先回顾一下迭绕式的缠绕顺序。我们仍以前面提到的转子槽数Z = 7的电机为例。图7—38(a)是迭绕式各元件的缠制顺序。第一个元件绕在槽 1 与槽 4 之间，第 2 个元件 绕 在 槽 2 与 槽 5 之间，第 3 个元件绕在槽 3 与槽 6 之间。这样继续绕下去，直到 7 个元件全部绕完为止。显然先绕的 元 件（如 元件 1 、2 、 3 ），它们的端部在下面，因此端部长度小，重量轻。而后绕的元件（如元件 5 、 6 、 7 ），它们的端部在上面，因而端部较长，重量也就较大。从图7—38(a)可以看出，先绕的元件集中在转轴的右边，因而转轴右面端部重量小。而后绕的元件集中在转轴的左边，因而转轴左边端部重量大。由于转轴两边的端部重量不平衡，所以运行时，电机会产生振动。

针对迭绕式的缺点进行改进，便出现了对绕式。对绕式

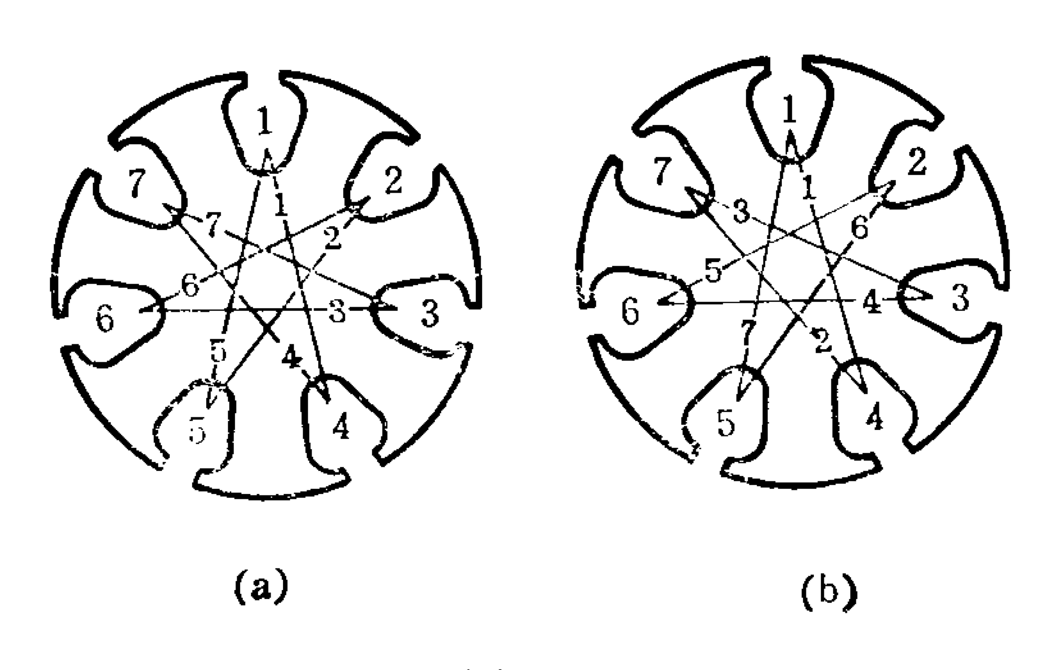


图7—38

的特点是：使先缠绕的元件端部，不要集中在转轴的一边，而是分布在转轴的两边，使其对转轴对称，后绕的元件也是如此，这样，端部的重量就能均匀分布了。具体的缠绕顺序如图7—38(b)所示：元件1缠绕在槽1与槽4之中，元件2缠绕在槽4与槽7之中，先绕的这两个元件1与2，它们的端部分别布置在转轴的两边，重量是平衡的。然后在槽7与槽3之间绕第3个元件，在槽3与槽6之间绕第4个元件，这两个元件的端部也分别布置在转轴的两边，重量也是平衡的。这样按照图7—38(b)所标出的元件顺序，将7个元件全部绕完为止。从图7—38(b)可以清楚看出对绕式的特点，即：先绕的两个元件端部是分布在转轴的两侧，后绕的两个元件端部也是分布在转轴的两侧，所以端部重量能均匀分布，电机旋转时也就不容易振动了。

这里我们要着重指出，迭绕式与对绕式的不同之处，只是在元件缠绕的先后次序上有区别，至于相邻元件之间的串联方法，以及元件与换向器片之间的联接方式，不论是迭绕式还是对绕式，完全一样，都遵守第四章中所介绍的接线规律。

在迭绕式中，相邻的两个元件是先后依次缠绕的，一面绕线一面就可以将元件之间按头接尾的规律串联起来，具体方法如图7—36所示。待所有元件绕完之后，元件之间也全部串联起来了，线头不容易乱，也不容易出现元件反接的故障。但对绕式情况就不同了，两个相邻的元件不是先后依次缠绕的。以图7—38(b)为例，槽1中的元件是第一个绕成的，而槽2中的元件却是第6个绕成的。相邻的元件不是依次先后缠成，没有办法一面绕线一面就将元件之间串联起

来。如果等元件全部绕完后再接线，则线头太多，容易搞乱。此时最好是每绕一个元件，就将此元件的首端焊到相应的换向器片上，而将其尾端空着，待所有元件都绕完以后，再用万用表或试灯，寻找每个元件的尾端，把它焊到相应的换向器片上去，具体的方法我们可以用一个7槽14个换向器片的电机为例来说明。由于是7槽14个换向器片，所以一个槽对应两个换向器片，例如槽1对应于换向器片1和2，槽4对应于换向器片7和8，等等。由于是14个换向器片，因此，这个电机有14个元件，每一个槽中有两个元件。参照图7—38 (b)，我们用两根导线并绕，在槽1与槽4之间绕第一个线圈，这一个线圈有两个元件，将它们的首端分别焊在换向器片1与2上，而将其尾端空着。然后在槽4与槽7之间绕第二个线圈，将它们的首端分别焊到换向器片7与8上，也将其尾端空着。按照这个方法继续绕下去，直到7个线圈全部绕完。然后再用万用表或试灯寻找每个元件的尾端，如图7—39所示。灯泡发光的线头表示是元件1的尾端，应接到换向器片2上去。同一槽中，各元件的尾端也可以套上不同颜色的套管，或者留不同长短的线头来区分。这种焊接方法也有它的缺点，那就是与换向片先焊接起来的线头，被埋在后

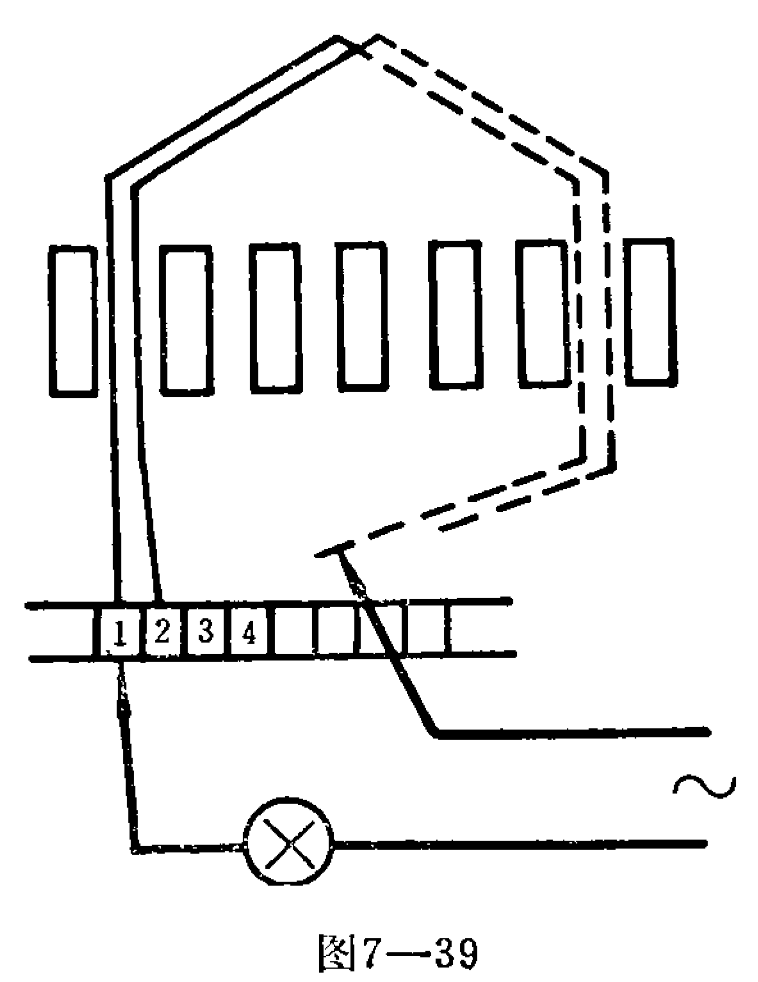


图7—39

绕元件端部的下面，看起来就不清楚醒目了，而且工艺上也不是十分简单的。

从附表一1、附表一2、附表一3、附表一6、附表一7、附表一8及附表一10可以看出，目前采用的转子槽数有9、10、11、12、15、16、19共7种。下面我们对9—19槽范围内对绕式的缠绕顺序，介绍如下。

（1） 9槽铁心

1—5，5—9，9—4，4—8，8—3，3—7，7—2，2—6，6—1。

（2）10槽铁心

6—10，1—5，5—9,10—4，4—8，9—3，3—7，8—2，2—6，7—1。

（3）11槽铁心

1—6，6—11，11—5，5—10，10—4，4—9，9—3，3—8，8—2，2—7，7—1。

（4）12槽铁心

7—12，1—6，6—11，12—5，5—10，11—4，4—9，10—3，3—8，9—2，2—7，8—1。

（5）13槽铁心

1—7，7—13，13—6，6—12，12—5，5—11，11—4，4—10，10—3，3—9，9—2，2—8，8—1。

（6）14槽铁心

8—14，1—7，7—13，14—6，6—12，13—5，5—11，12—4，4—10，11—3，3—9，10—2，2—8，9—1。

（7）15槽铁心

1—8，8—15，15—7，7—14，14—6，6—13，13—5，

5—12，12—4，4—11，11—3，3—10，10—2,2—9,9—1。

（8）16槽铁心

9--16，1—8，8—15，16—7，7—14，15—6，6—13，14—5，5—12，13—4，4—11，12—3,3—10,11—2,2—9，10—1。

（9）17槽铁心

1—9，9—17，17—8，8—16，16—7，7—15，15—6，6—14，14—5，5—13，13—4,4—12,12—3,3—11,11—2，2—10，10—1。

（10）18槽铁心

10—18，1—9，9—17，18—8，8—16，17—7,7—15，16—6，6—14，15—5，5—13,14—4,4—12,13—3,3—11，12—2，2—10，11—1。

（11）19槽铁心

1—10，10—19，19—9，9—18，18—8,8—17,17—7，7—16，16—6，6—15，15—5,5—14,14—4,4—13,13—3，3—12，12—2，2—11，11—1。

不论是迭绕式还是对绕式，在缠绕线圈的过程中，要求工作台及周围环境整齐清洁，以防铁屑等杂物落入槽内，刺破绝缘。同时要求操作者双手干净，以防止汗水油污沾在导线上，腐蚀绝缘。同时要细心谨慎，不要将导线碰到铁心及换向器的棱角处，以免碰伤导线绝缘。

迭绕式和对绕式一般习惯的缠绕方法都是手工绕制，即左手拿转子，右手理线，一边缠绕，一边记数。这种绕制方法有一个很大的缺点，就是往往将匝数记错，特别是匝数较多时，尤其如此。因此最好是做一个如图 7 —40所示的简单

转子支架，在普通绕线机上绕线，用转数计记数，操作既简便，记数也准确。

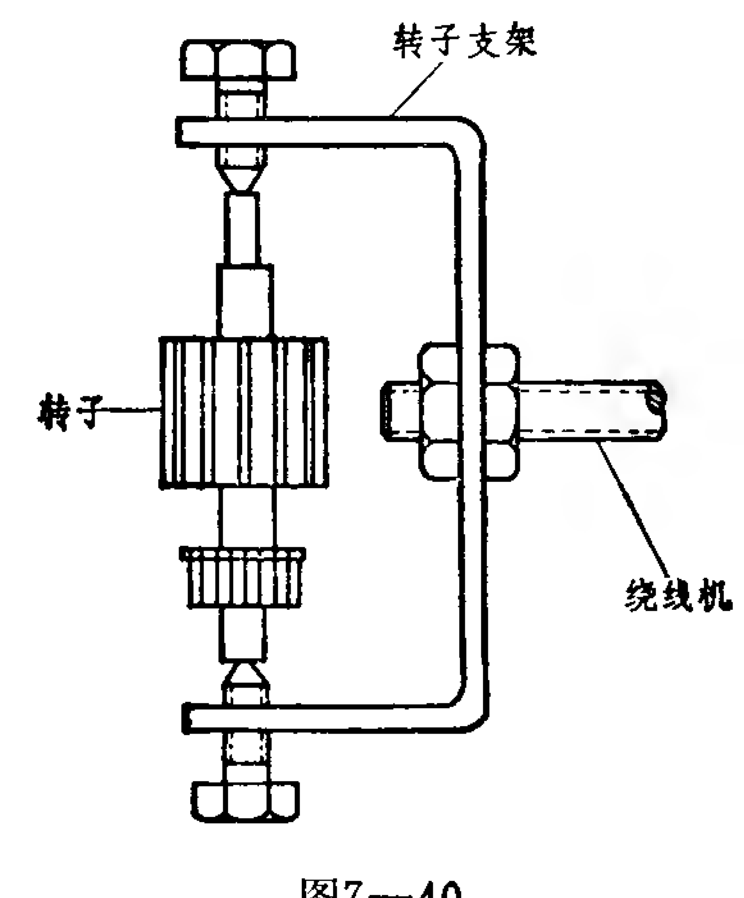


图7—40

四、线头焊接

一个元件焊接到哪一个换向器片上，这是一个十分重要的问题，在5—3节讨论改善换向方法时，我们已作了详细分析。元件在换向器片上的焊头位置有下面三种情况：

1.绝大多数都是顺转向移动元件到换向器片上的焊头位置。从附图—1到附图—12可以看出，除了附图—9是个特例外，所有电动工具用串激电动机，都是顺转向移动元件到换向器片上的焊头位置，以改善换向过程。

2.由于短矩的影响，在一般用途的串激电动机中，也有逆转向移动元件到换向器片上的焊头位置的，例如附图—13及附图—17等就是这种情况。

3.对于正反转电机，元件到换向器片上的焊头位置都是逆着元件缠绕方向偏移的。例如附图—15、附图—16及附图—19。

从5—3节的分析我们知道，元件到换向器片上的焊头位置，向那个方向偏移，偏移多少，不仅对换向及火花产生影响，对电机的其他性能如转速转矩等也会产生影响，所以是一个十分重要的问题，应该特别重视。

如图7—33所示，在拆除旧绕组时，我们对元件到换向器片上的焊头位置已作了记号，此时就可以依照这个记号，依次将线头嵌入到换向器片的线槽中。如果在拆除旧绕组时，忘记了作记号，或者电机经过修理，对原有接线是否正确有怀疑，那就只好根据附图—1到附图—25参照转速、尺寸相近的同类型电机的接线方式进行接线了。

接线过程的具体工艺如下：在线圈端部和换向器之间用玻璃丝带或其他绝缘材料填满，外包一个玻璃丝漆布带的锥形套，以使引线与绕组端部隔开。相邻两引线之间夹一条漆布带，作为引线之间的绝缘。也可将引线套以套管来绝缘。然后将线头焊接处的绝缘漆刮除干净，以便焊接。注意：在刮除绝缘漆时，不要将刮下来的物质落入线圈内，因为其中有铜屑，容易造成短路故障。绝缘漆刮除以后，就可将线头嵌入换向器片的线槽中了。如果换向器片的线槽较宽，线头嵌不牢时，可临时用橡皮筋固定住。待线头全部接完后，就可以进行焊接。焊剂应选用松香酒精溶液，决不可采用带有腐蚀性的焊锡药膏或焊锡药水。焊接前，应在换向器片的线槽中涂以少量的松香酒精溶液，以利焊接过程的顺利进行。焊接时，应把换向器端放低，另一端放得高些，使转子处于倾斜位置，以防止焊锡流入线圈内部，造成短路通地故障。全部焊完后，用刀割去接线槽外伸出的多余线头，最后将换向器片间的焊锡清除干净。

一般情况下，在修理串激电机时，元件线头与换向器片之间，都是采用锡焊的方法。但使用这种焊接方法，线头焊接得不够牢固，当转子直径较大，转速又较高时，焊接头往往在离心力的作用下被甩开，此时最好采用点焊的方法。但

点焊机只在制造工厂有此设备，修理部门尚未推广采用。

五、端部绑扎，检查试验，浸渍烘干

一、端部绑扎

单相串激电动机一般转速较高，因而离心力很大。在离心力的作用下绕组端部和引线头极容易散开而飞出来。因此在靠近换向器一端的绕组端部，必须绑扎一道蜡线或弦线，线径的粗细应根据转子直径的大小适当选用。

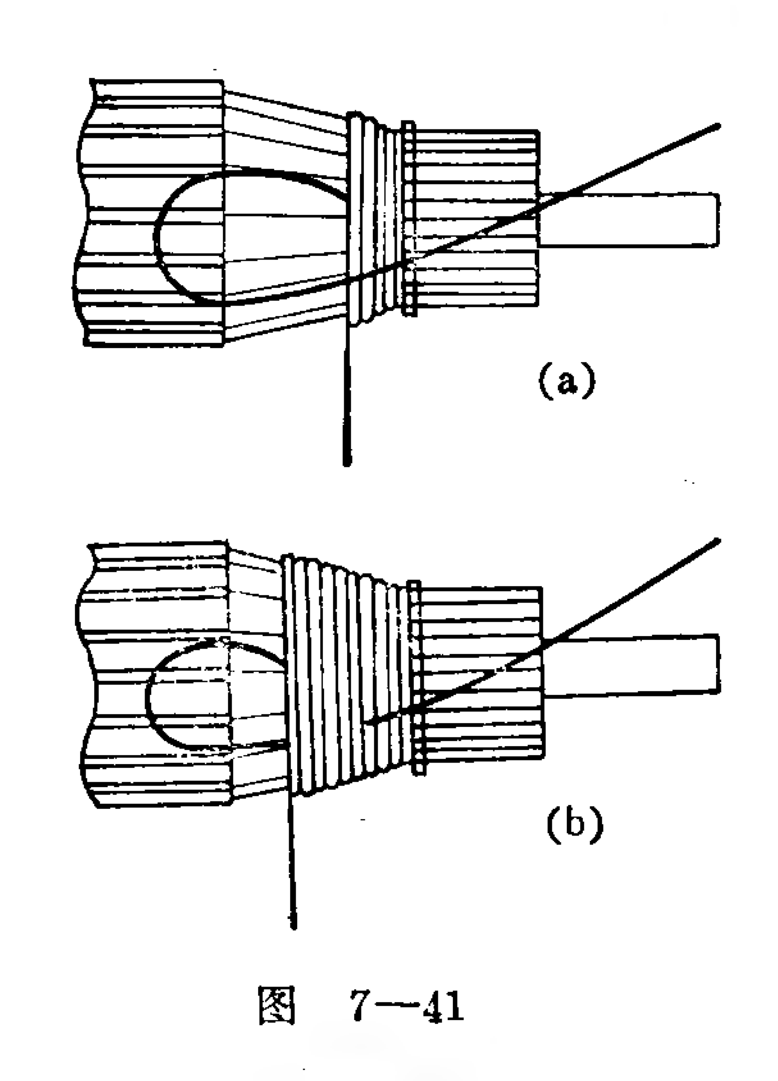


图 7—41

绑扎的方法如图 7 —41所示。从换向器端开始缠绕，起端线头约留 150 毫米左右，缠绕几圈压住起端线头。然后把留在外面的起端线头打一圈〔图7—41(a)〕，在这个圈上继续绕线〔图7—41(b)〕。端接部分全部绕满以后，把绑扎线的末端穿入圈结，然后拉起端线头，将末端线头拉到绑扎线的下面，最后把绑线起端余线剪断，绑扎工作便告完成。

二、检查试验

按照上述步骤将转子绕组重绕完毕以后，必须进行下面一些检查试验，以判断重绕是否正确，这些检查试验是：（1）元件是否反接；（2）焊头位置是否错误；（3）绕组内部是否有断路及短路；（4）绕组是否通地。检查的方法在

7－2、7—3、7—4、7—5节中已详细介绍，此地不再重复。这些检查试验必须在绕组浸渍处理以前进行，因为绕组经过浸渍处理以后就成为一个整体，那时发现故障就不容易纠正了。

转子绕组经过上述检查，如果一切正常，可将电机装配起来，进行运转试验。首先观察其旋转方向，如果反向旋转，可将激磁绕组与电刷架连接的两个线头互换一下，即可纠正。如果火花较大，从电刷质量、弹簧压力、接触面的好坏等方面又无法使火花减少，那就可能是元件到换向器片的焊头位置不正确，可用移动电刷架的方法来调整火花的大小。如果刷架的位置不能移动，那就必须改变元件到换向器片的焊头位置。此时可设法移动端盖的位置。由于电刷固定在端盖上，移动端盖的位置，也就是移动了电刷的位置。根据5－3节所介绍的道理可以推论出来：如果端盖的位置逆时针方向转过5°，电机火花较小，那元件到换向器片的焊头位置就必须顺时针方向移动5°。

进行运转试验时必须注意下面两点。

1.在1－3节、2－3节及3－4节中我们曾反复强调，串激电动机具有较软的机械特性，空载转速远比满载转速高。因此，串激电动机不允许在额定电压下空载运行，以免离心力过大，使电枢绕组损坏。在进行运转试验时，一定要在低电压下进行，同时用转速表监视转速，使其不要超过额定值。

2.运转试验的时间不要太长，因为电枢绕组尚未浸渍，绕组的机械强度不高，在离心力作用下很容易散开而损坏。

三、浸渍烘干

如果运转试验正常，就可以进行最后一道工序——浸漆与烘干。由于串激电动机转速较高，对机械强度的要求也就较高，因此浸渍烘干这道工序质量的好坏，对电机是否经久耐用关系很大。当采用 644 环氧树脂浸渍时，它的工艺过程简单介绍于下：

（1）预烘 4 小时。90℃ 2 小时，120℃2小时。

（2）保持转子温度在110℃左右浸渍，以浸透为原则。

（3）滴干 1 小时。

（4）烘干15小时。90℃ 1 小时，120℃14小时。

为了保证转子平衡，在滴干、烘干时，必须将转子竖立放置，以免漆膜固化在转子的一边，容易造成不平衡。一般要求用同样的方法浸烘两次。第一次换向器朝上竖放，第二次换向器朝下竖放，以使两端漆膜均匀。

单相串激电动机转子绕组的修理工艺并不复杂，但要使修理好以后的转子经久耐用，能经受得住长时间运行的考验，则下面两点技术要求，应给以特别的重视。

1.由于单相串激电动机往往是高转速的，转子绕组要承受巨大的离心力，同时要求转子绕组在热态下也不变形，所以转子线圈一定要用高强度漆包线或丝漆包线紧绕在转子槽内。并用耐高温的绝缘漆充分浸透，使漆充满槽内的空隙。烘干时必须使漆充分固化，以使转子形成一个牢固的整体。

2.由于单相串激电动机是高转速的，转子重量只要有一点微小的不平衡，运转时便会产生剧烈的振动，因此修理好以后的转子最好是校正动平衡。在没有动平衡机的情况下，修理时必须处处考虑转子的平衡问题，例如：采用对绕式，使绕组端部重量均匀分布。烘干时竖立放置，避免漆膜固化

在转子的一侧。在车削换向器时，要保证与轴承档的同心度。有的在风叶上去重校平衡，在拆装风扇时，仍应保持风扇原来的位置等。只有充分注意到平衡问题才能使修好以后的转子不会产生剧烈的振动。

7—10 定子绕组重新绕制

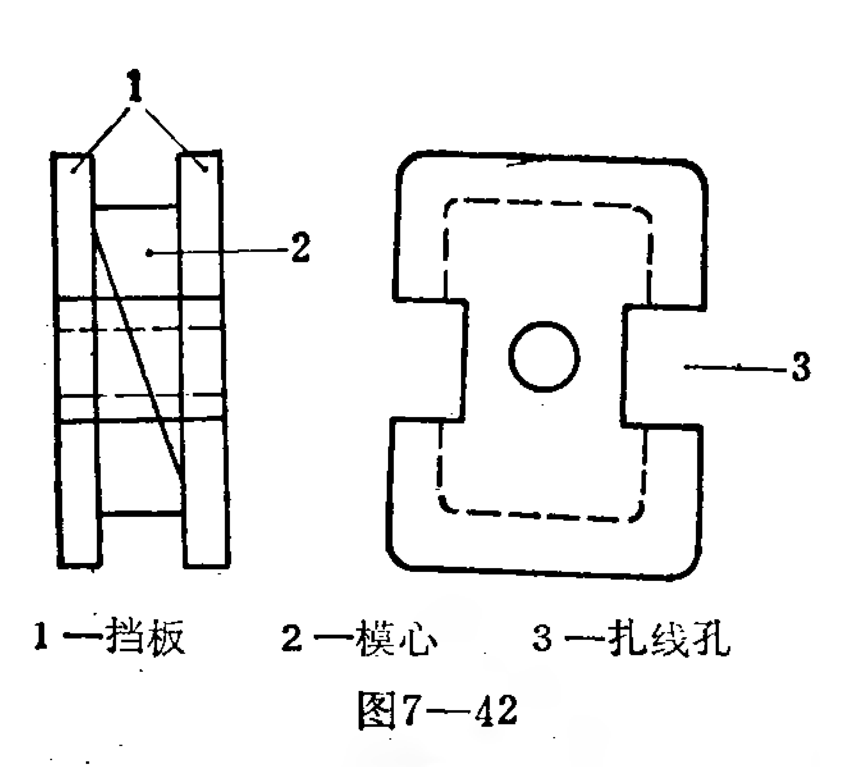
重新绕制定子绕组，可分下面几个步骤进行。

一、拆除旧绕组

先将扣住线圈的扣子或销子取出，然后将线圈从磁极上取下。线圈取出后用两块木板夹住，在台虎钳上压平。拆除外包的绝缘带，测量线圈内圈的尺寸及厚度，作为制做绕线模的根据。同时将线圈的匝数及线径记入表7—2中。

二、制作绕线模

绕线模的形状如图7—42所示。线模由两块挡板及斜劈开的两块模心所组成。模心尺寸应和拆下的旧线圈内圈尺寸相同，模心厚度应等于线圈的厚度。在前后两块挡板上开有两个缺口，是作为绑扎线圈用的。



1—挡板　2—模心　3—扎线孔

图7—42

三、绕制线圈

将线模装到绕线机上，把计数刻度拨到零，开始绕制线圈。线匝一定要排列整齐。绕到所需要的匝数以后，将扎线穿过缺口把线圈扎住，然后把线圈从线模上取下。线圈的两

个线头要焊接多股软线作为引出线。在引出线的焊接处，应用绝缘衬垫使其与线圈隔开。然后用绝缘带采用半迭包的形式包一层，并将引出线包扎在线圈的里面，以使引线紧扎在线圈内部，这样引线就不易拉断。最后再用白纱带半迭包包一层，作为保护层。

四、浸漆烘干处理

将磁极线圈套入磁极，并把线圈的两个端部略撳弯成和磁极一样的弧度，再用扣子、销子或其他方法使线圈固定在磁极上。

定子绕组最好也采用环氧无溶剂漆浸渍，在条件不具备时也可用1032三聚氰铵醇酸漆来代替，具体工艺过程如下：

（1）预烘4小时。90℃ 2小时，120℃2小时。

（2）等工件温度降至60℃—80℃时，浸渍约20分钟，以浸透无气泡为原则。

（3）滴干1小时。

（4）烘干7小时。90℃ 2小时，120℃5小时。

一般要求浸烘两次。每次浸渍以后，应将铁心上的余漆擦净，以减少以后的清理工作。

在第七章中，我们介绍了单相串激电动机的故障检查方法，以及定、转子绕组的重绕工艺，实际上，这些内容不仅适用于单相串激电动机，也适用于直流电机，特别是小型直流电机。这些内容是所有换向器式电机的共同问题，是带有普遍意义的。

第八章　串激电动机的噪音及无线电干扰

在前面七章中，我们主要是研究电机本身的有关问题，例如：基本特性、匝数计算及检查修理等。在这一章中，我们将研究电机对周围环境的影响。这种影响表现在两个方面：一是电机发出的噪音，二是对无线电通讯设备的干扰。噪音及无线电干扰这两个问题在其他类型电机中也存在，但不如在单相串激电动机中那样突出。单相串激电动机噪音比较大，对无线电的干扰比较严重，这是众所周知的问题，因此有必要对它们产生的原因及抑制方法作一简单的介绍。

8—1　串激电动机的噪音

电机中产生噪音的主要原因是：（1）在运行过程中，电机各种零部件的弹性变形及周期性振动。任何能够引起电机振动的因素，都能导致噪音的产生。噪音及振动是同一种现象的两种表现，是相伴而生的。（2）冷却空气在电机中流动时所产生的涡流。

声音总是以波动的形式向外传播，如果用一个形象化的比喻，就如同一个小石头投入水中以后，产生的水波也是以波动的形式逐渐向外传播一样。既然声音是以波动的形式向外传播，如同表示电流的正弦波一样，它也有一个频率的问题。不是所有频率的声波都能为人的耳朵所能听到。人的耳

朵能感觉到的只是频率从16—20到16000—20000赫芝范围内的声波，比这个频率再高的声波，人的耳朵是感觉不到的，称为超声波。试验证明，人的耳朵对频率为2000—3000赫芝的声音最为敏感，因此具有这个频率的噪音更是我们要消除的重点对象。

电机中产生的噪音可以分为三类，即：（1）机械噪音，（2）通风噪音，（3）磁噪音。分述如下。

一、机械噪音

电动机中产生机械噪音的因素是很多的，最常见的有：

（1）转子的不平衡；

（2）轴承；

（3）电刷在换向器上的滑行；

（4）固定和旋转部件的偶然碰撞；

（5）松动元件发出的拍击声。

后两种情况说明电机需要修理，它们不是正常的噪音源，因而下面不作讨论。

1.转子不平衡引起的噪音

单相串激电动机往往是高转速的，而离心力又正比于转速的平方，因此单相串激电动机的转子，只要有一点轻微的不平衡，在离心力的作用下便会剧烈的振动，产生较大的噪音。为了减少这种由于转子不平衡而引起的噪音，必须进行精密的动平衡试验以及增加轴的刚度。在修理单相串激电动机时，如果没有小型动平衡机，无法进行动平衡试验，那么，转子绕组应采用对绕式，以求得绕组端部重量能均匀分布，减少运转时的振动和噪音。

在研究噪音时，我们总是特别注意噪音的频率，这是因

为：

（1）如前所述，人耳对某些频率的声波特别敏感，而对另一些频率的声波又感觉不出来。因此噪音源所产生的频率是多少，可以判断这个噪音的性质。是特别刺耳的呢？还是人耳对它并不是很敏感的。

（2）如前所述，电机的噪音主要分为通风噪音、机械噪音及磁噪音。某台电机究竟以那种噪音为主，目前的分析方法主要是频谱分析法。我们利用仪表测量出电机噪音的频谱图后，首先要看主要噪音出现在什么频率，然后再根据这个频率分析噪音属于什么性质，最后才能提出降低噪音的措施。

所有电动机由于转子不平衡而引起的噪音，它的频率计算公式是：

$$f_r = \frac{n}{60} \qquad 8-1$$

式中：n——转子的转速，转/分。G 系列单相串激电动机的转速范围是4000—12000转/分，由转子不平衡而产生的噪音频率 $f_r = 67$—200 赫芝。新系列电动工具用串激电动机的转速范围是 $n = 9900$—14300 转/分，由转子不平衡而产生的噪音频率 $f_r = 165$—240赫芝。

2.轴承噪音

这种噪音是由轴承元件在滑动或滚动接触中产生的。噪音的大小主要与电动机选用的轴承有关，当然电动机的结构型式也对轴承噪音有轻微的影响，因为不同的结构有不同的振动传递特性。

这种噪音的频率在很大程度上取决于轴承的类型，滑动

轴承和滚珠轴承所产生的噪音频率差别是很大的。首先我们看滑动轴承。当转轴在滑动轴承的轴套中旋转时，可以产生低频噪音。根据轴承表面和滑润剂的情况，也可能会产生某些高频噪音。如果有轴向油槽将产生下面两种频率的噪音。

$$f_r = \frac{n}{60} \quad 8-2$$

$$f_g = Gf_r = G\frac{n}{60} \quad 8-3$$

式中：n—转子转速，转/分；G—轴向油槽数。滑动轴承的噪音比较小，在要求低噪音运转的电机中，应优先采用滑动轴承。

下面我们再来研究滚珠轴承。由于滚珠轴承中具有大量相对运动的元件，因此它的噪音要比滑动轴承大的多。可以产生多种频率的噪音，最显著的五种频率噪音及其产生的原因如下：

（1）极轻微的不平衡或内座圈偏心可引起如下频率的噪音。

$$f_r = \frac{n}{60} \quad 8-4$$

式中：n—转子转速，转/分。

（2）滚动元件排列和外罩不规则可引起如下频率的噪音。

$$f_t = \frac{n}{120} \quad 8-5$$

式中：n—转子转速，转/分。

（3）元件粗糙的斑点或缺损可引起如下频率的噪音。

$$f_e = \frac{n}{60} \quad \frac{r_o}{r_e} \qquad 8-6$$

式中：n—转子转速，转/分；

r_o—外圈滚道半径，毫米；

r_e—滚动元件半径，毫米。

（4）内座圈不规则可产生如下频率的噪音。

$$f_i = E\frac{n}{120} \qquad 8-7$$

式中：n—转子转速，转/分；

E—滚动元件数。

（5）外座圈不规则可产生如下频率的噪音。

$$f_o = E\frac{n}{120} \qquad 8-8$$

式中：n—转子转速，转/分；

E—滚动元件数。

不论是滑动轴承还是滚动轴承，它们的噪音还要受到下面三个因素的影响。（1）润滑剂的种类及数量对减少轴承噪音有巨大的作用。润滑剂中杂质越多，轴承的噪音就越大。（2）使用时间一长，滑动或滚动表面粗糙，轴承噪音会增大。（3）轴承制造及装配质量在很大程度上影响到轴承噪音的大小。

3．电刷噪音

单相串激电动机中，电刷噪音是机械噪音的主要来源之一。这种噪音不仅是由于电刷和换向器的摩擦所引起，并且也由于换向器表面不平及电刷盒未能安装牢固而产生的周期性振动所引起。电刷噪音的大小与电刷倾斜的角度、电刷

压力的大小以及电刷与换向器表面的光洁程度有关，电刷噪音的频率是：

$$f_b = \frac{kn}{60} \qquad 8-9$$

式中：n—转子转速，转/分；k—换向器片数。减少电刷噪音的主要措施是：要求换向器表面平整光洁，刷盒结构牢固，电刷及换向器表面要精密研磨。经过一段时间运行以后，电刷与换向器接触的情况改变了，电刷噪音的大小也会改变。

二、通风噪音

大多数通风噪音都是由冷却空气中的涡流所引起的。产生涡流的原因有两个：一是风扇鼓风时，使空气产生涡流；其二是冷却空气在电机内部流动时，遇到固定部件的阻挡而产生涡流。

通风噪音具有比较宽广的频率分布，涡流的加强和削弱都会引起噪音大小及其频率的变化。风扇鼓风时所产生噪音的基本频率为

$$f_v = \frac{Nn}{60} \qquad 8-10$$

式中：n—转子转速，转/分；N—风扇的叶片数。为了削弱通风噪音，必须使风扇的叶片数为质数，如13、17、19、23等。增大风扇外径与端盖间的径向间隙，提高风扇的刚度和仔细地使风扇平衡都可以减弱通风噪音。将风扇尖锐的边缘弄圆以及造成流线性的风路也能减小噪音。从减少噪音的角度来讲，电机最好是采用轴向压力通风。

三、磁噪音

根据电工知识我们知道，磁力线有缩短自己长度的倾

向。当空气隙中通过磁力线以后，由于磁力线有缩短自己长度的倾向，在定子和转子之间就要产生一个拉力，这个拉力就称为磁拉力。在磁拉力的作用下，定、转子会产生弹性变形。当电机旋转时，如果磁拉力的情况反复发生变化，电机变形的情况也会反复发生变化，于是引起了电机振动，伴随振动而来的就是噪音，这种噪音就称为磁噪音。下面我们以图 8 —1 为例来研究噪音产生的具体过程。这是一个两极电机，转子上有 8 个齿，为了图形清晰醒目，所有绕组及其他零部件均未画出。当转子处于图 8 —1(a) 这种部位时，对上面这个磁极而言，转子齿 2 与齿 3 正位于磁极之下，这两个齿上有磁力线通过，由于这两个齿上的磁力线要缩短自己的长度因而产生磁拉力，使定子磁极受到了图中箭头所表示的拉力。这个拉力的位置显然在齿 2 与齿 3 之间，即位于上面这个磁极的左边。对于下面这个磁极来讲，情况也类似，此时转子齿 6 与齿 7 正位于磁极之下，这两个齿上有磁力线通过，这两个齿上的磁力线也要缩短自己的长度而产生磁拉力，

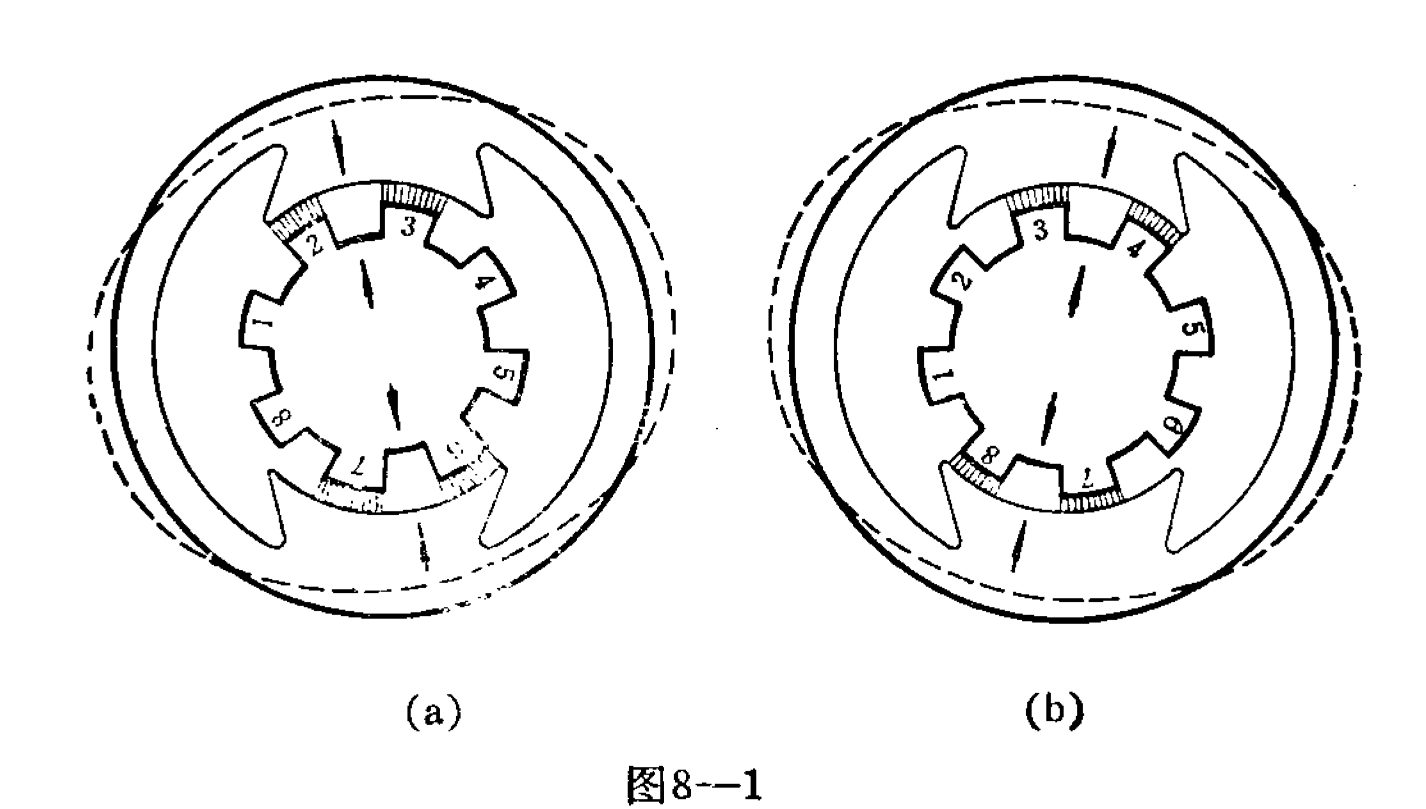


图8—1

使下面这个磁极也受到了如图中箭头所表示的这样一个拉力，这个拉力的位置显然在齿 6 与齿 7 之间，即位于下面这个磁极的右边。从图8—1(a)可以看出，由于两个磁极上都受到拉力，这就使定子铁心产生变形，由圆形变成图中虚线所表示的椭圆形。

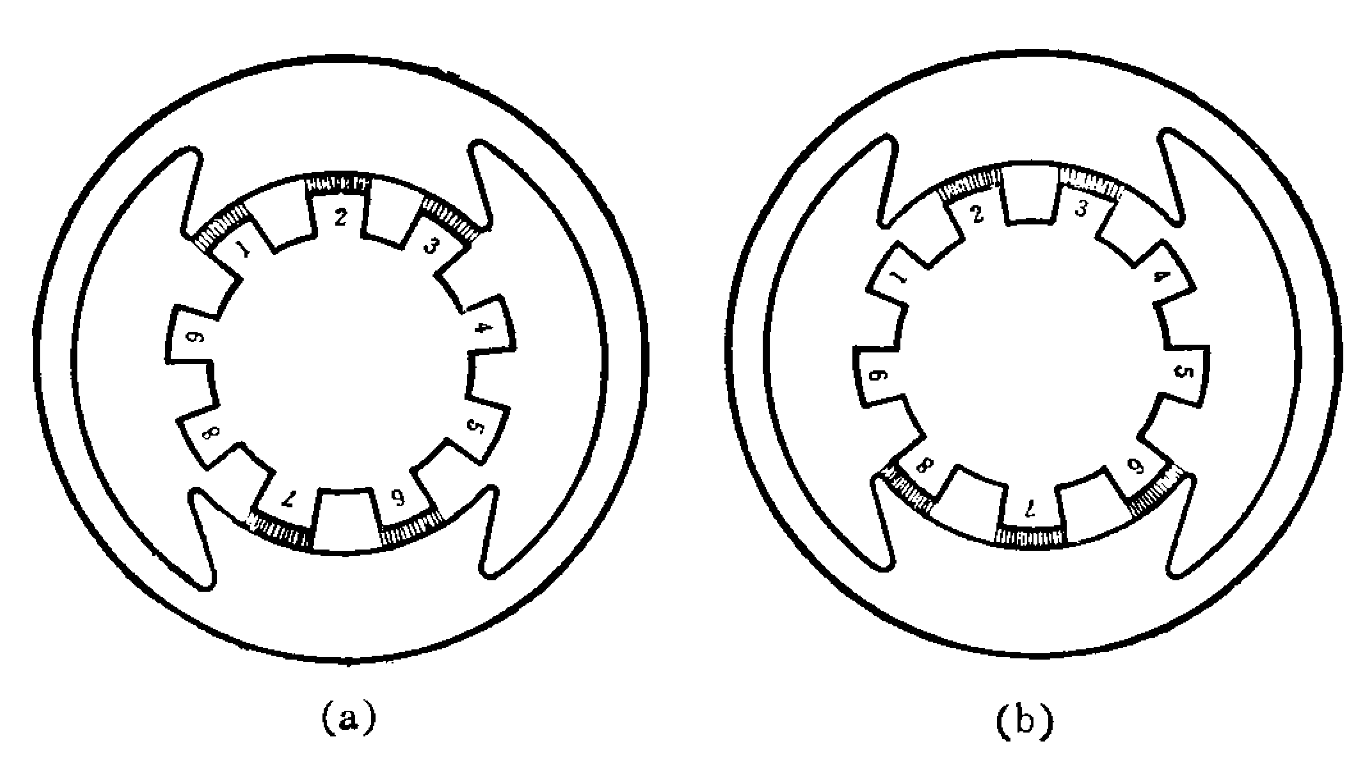
当转子逆时针转过一个小角度后，便得到图 8 — 1 (b)。在图 8 — 1 (a) 中，对上面一个磁极而言，是左极尖对应于转子齿，右极尖对应于转子槽。在图 8 — 1 (b) 中，情况相反，对上面这个磁极而言，是左极尖对应于转子槽，右极尖对应于转子齿。下面我们研究图 8 — 1 (b) 中定子铁心的变形情况。在图 8 — 1 (b) 中，转子齿 3 与齿 4 位于上面这个磁极之下，这两个齿上所产生的磁拉力，使上面这个磁极受到一个如图中箭头所表示的拉力，这个拉力的位置在齿 3 与齿 4 之间，与图 8 — 1 (a) 中受力情况不同，是位于上面这一个磁极的右边。转子齿 7 与齿 8 位于下面这一个磁极之下，这两个齿上所产生的磁拉力，使下面这个磁极上也受到一个如图中箭头所表示的拉力，这个拉力的位置在齿 7 与齿 8 之间，即位于下面这个磁极的左边。从图 8 — 1 (b) 可以看出，此时两个磁极上也受到拉力，也使定子铁心变形，由圆形变成图中虚线所表示的椭圆形。当转子旋转时，转子交替地处于图 8 — 1 (a)或图 8 — 1 (b)所表示的位置，因此定子铁心便交替地产生图 8 — 1 (a) 或图 8 — 1 (b) 所表示的变形。定子铁心这种周期性的变形，就是一种振动，伴随这个振动而来的就是噪音，产生这种噪音的根本原因是磁拉力，因而称它为磁噪音。

根据力学原理我们知道，当定子上受到一个向内的磁拉

力时，转子上必定受到一个向外的磁拉力。在图 8 — 1 中，转子上的两个箭头，就表示了转子上的受力情况。由于转子是一个实心的整体，这样的拉力不易使它产生变形。同时，这两个拉力大小相等，方向相反，互相抵消，也不会使转子产生位移。因此在这两个力的作用下，转子是不会产生振动和发出噪音的。

在图8—1中，转子上是 8 个齿，即偶数齿。从对上面图 8 — 1 的分析，可以得到如下的结论：即当转子齿数为偶数时，定子会产生周期性变形，发出磁噪音。转子不易产生变形，也不会产生这种类型的磁噪音。

下面我们再以图 8 — 2 为例，研究当转子槽数为奇数时，定、转子铁心的受力情况。这个电机转子是 9 个齿，当处于图 8 — 2(a) 这种位置时，上面一个磁极下转子有 3 个齿，而下面一个磁极下只有两个齿。由于在这两个磁极下，转子齿数不相等，每个齿下磁通密度的大小不一样，磁拉力的大小也不会一样，由于这两个磁极对转子磁拉力的大小不一



(a)　　(b)

图8—2

样，就将转子拉向一侧。当转子转过一个小角度后，便得到图8—2(b)。图8—2(b)的情况同图8—2 (a)正好相反，是上面一个磁极下转子有两个齿，而下面一个磁极下转子有三个齿，两个磁极对转子磁拉力的大小也不一样，将转子拉向另一侧。当转子旋转时，转子交替地处于图8—2(a)和图8—2(b)的位置，由于两个磁拉力的不相等，转子交替地被拉向下面或拉向上面，于是转子产生振动，发出噪音。当转子槽数为奇数时，不仅是转子要产生振动，发出噪音，定子也要产生振动，发出噪音。这个道理也可以通过图8—2来解释。在图8—2(a)所示的这种转子位置时，上面一个磁极下，转子有三个齿，而在图8—2(b)所示的这种转子位置时，上面一个磁极下，转子只有两个齿。从这两个图形可以看出，不同的转子位置，定子磁极下对应的齿数不相等，磁拉力的大小也就不会一样了。当转子旋转时，转子的位置在不断变化，磁极上所受到的磁拉力的大小也在不断变化，因而使定子产生振动，发出噪音。

在图8—1及图8—2中，这种由于齿槽变化而产生的磁噪音，它的基本频率可用下式计算

$$f_z = \frac{Zn}{60} \qquad 8—11$$

式中：n—转子转速，转/分； Z—转子齿数。前面我们曾经提到：人耳能够听到的是频率从16—20到16000—20000赫芝范围内的声波，而对频率为2000—3000赫芝的声音最为敏感。下面我们进一步分析，电动工具用串激电动机，它们产生的磁噪音具有怎样的频率范围。所用的计算公式就是上面的式8—11，有关数值见附表—1。

（1）J1Z—6：转子齿数Z＝9，转速n＝13500转/分。

$$f_z=\frac{13500}{60}\times 9=2025\ 赫芝$$

（2）J1Z—10：转子齿数Z＝12，转速n＝10300转/分。

$$f_z=\frac{10300}{60}\times 12=2060赫芝$$

（3）J1Z—13：转子齿数Z＝12，转速n＝10000转/分。

$$f_z=\frac{10000}{60}\times 12=2000赫芝$$

（4）J1Z—19：转子齿数Z＝15，转速n＝9000转/分。

$$f_z=\frac{9000}{60}\times 15=2250赫芝$$

从上面四个例子可以明显地看出，老系列电钻所产生的磁噪音，它们的频率正好在人耳最敏感的波段内，新系列电钻也有类似的情况。

图8—1及图8—2只是两个比较简单的定、转子铁心上所受到的磁拉力情况，而实际情况远比这两个图形复杂得多。

串激电动机在交流电源下运行时，除了由于齿槽位置变化而产生的磁拉力外，还有由于主磁通随时间交变而产生的周期性的磁拉力。因此串激电动机在交流电源下运行时的噪音要比在直流电源下运行的噪音大。

为了削弱串激电动机的磁噪音，可以采取下列措施：

1.从图8—1及图8—2的分析过程中，可以明显地看出，产生磁噪音的根本原因是由于齿和槽的磁导不等而引起的。齿部磁通密度高，槽部磁通密度低。转子旋转时，齿和槽的位置不断地变化，使电机内部磁通密度的分布情况在交

替地变化，磁拉力的大小也随之而交替变化，因而使定、转子铁心振动，发出噪音。所以，从减少磁噪音的角度来看，转子应当采用半闭口槽，并尽量减少槽口的宽度，使齿槽磁导不等的影响尽可能地缩小。

2.从减少噪音的角度来看，两极电机的转子最好是采用偶数槽。因为从上面的分析可以看出，当转子为偶数槽时，磁拉力只能使定子振动，而不能使转子振动，因而噪音小。当转子为奇数槽时，磁拉力使定、转子同时振动，因而噪音大。

3.电工知识告诉我们，磁拉力的大小是正比磁通密度 B 的平方。如果在设计电机时，选用较低的磁通密度 B，则能大幅度的降低磁拉力。磁拉力小了，电机的振动情况会改善，噪音自然会小下来。但是，随着电机制造的发展，为了充分利用材料，都是选用较大的磁通密度，这样磁拉力以及电机的振动及噪音都会相应的增大，在设计时更要采取相应的削弱措施。

上面我们曾经提到，电机内部磁拉力的情况是复杂的，不同的磁拉力产生的噪音，应采用不同的方法来消除。深入的数学分析可以证明，下面一些措施对消除磁拉力产生的噪音也是极为有效的。对于这些方法，因篇幅有限我们只能介绍它的结果，而无法分析它的理由了。

4.转子采用斜槽。在转子圆周上，一个齿槽所对应的长度称为齿距 t（见图 8 — 3）。为了削弱磁噪音，斜槽的距离应等于齿距的整倍数。例如斜槽 1 个齿距—t，斜槽 2 个齿距—2t，斜槽 3 个齿距—3t。图 8 — 3 是斜槽一个齿距的图形。从削弱磁噪音的角度来说，斜槽的距离越大，效果越好。

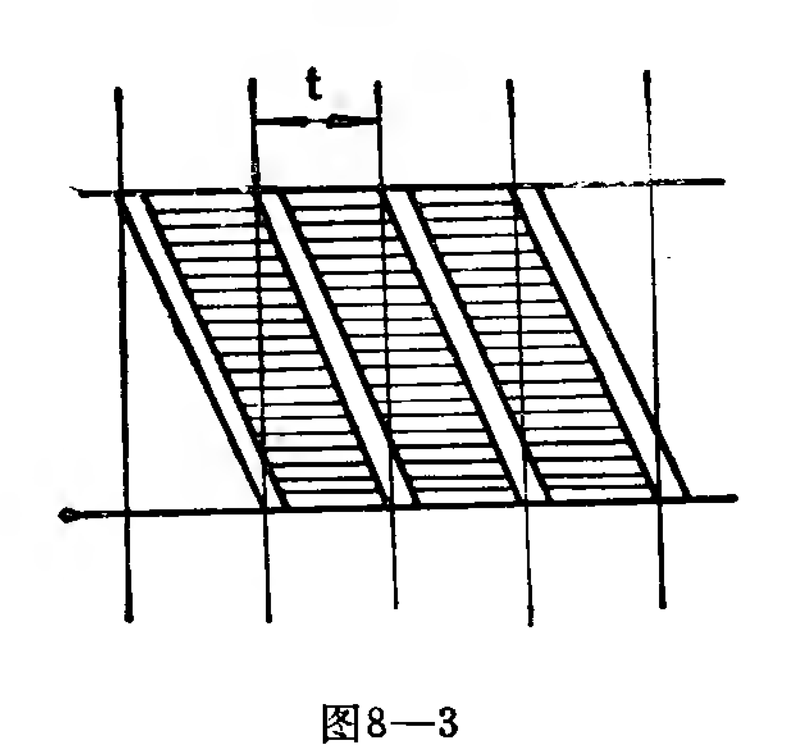


图8—3

斜槽3个齿距比斜槽2个齿距效果好。斜槽2个齿距又比斜槽1个齿距效果好。但斜槽太大会带来工艺上的困难，而且槽的面积会缩小，使铁心不能得到充分利用。所以一般情况下都是斜一个齿距。

5.选用较多的转子槽数，转子每极槽数最好是大于12。目前我们国内生产的电动工具用串激电动机每极槽数约为4.5—9.5之间，一般的串激电动机每极槽数约为4～9.5之间，是低于这个数值的。

6.如果转子采用直槽，则定子极弧宽度的选取应该遵守下列公式

$$b=(k+\frac{1}{2})t \qquad 8-12$$

式中：b—极弧长度，厘米；

t—齿距，厘米；

k—任意整数。

如果转子采用斜槽而同时每极槽数又大于12，此时定子极弧宽度的大小对噪音影响不大，那就不一定遵守式8—12所给出的关系了。

7.采用图6—12所示的不均匀气隙，也有利于削弱磁噪音。

8.产生磁噪音的根本原因是由于在磁拉力的作用下定、

转子铁心振动而引起的。如果定、转子铁心的固有振动频率与磁拉力的频率一致,则振动加强,噪音变大。此时只有改变定子磁轭的高度或转子轴的直径，以改变定、转子铁心的固有振动频率，使其不要与磁拉力的频率相等。

8—2 无线电干扰及抑制方法

随着国民经济的发展，无线电广播事业、电视、无线电通讯愈来愈发展。而与此同时，电机的使用范围及数量也愈来愈扩大。但是，电机工作时，会产生高频电能。频率稍低的高频电能，往往通过电动机的电源线向外传播。频率高一些的高频电能，则具有辐射性。通过这两种途径，高频电能有可能进入无线电接收机，干扰接收的质量，有时甚至使收讯成为不可能。因此防止电机发生的高频电能对无线电的干扰，是一个十分重要的问题。随着工业化程度的提高，这个问题的重要性是愈来愈突出了。

在各种类型的电机中，交流串激电动机是产生无线电干扰最严重的电机之一。这是因为产生无线电干扰的主要原因，是换向过程所产生的火花及电弧。而交流串激电动机的换向情况比较恶劣,火花问题比其他电机严重,所以它产生的无线电干扰，也就比其他电机更为突出。此外交流串激电动机往往用在电动工具中，使用范围广泛而带有流动性，更容易接近无线电的收讯设备，因此比其他电机对无线电产生干扰的可能性更大。

同一种转速、容量的交流串激电动机，它对无线电机干扰的程度，主要由它换向情况的良好与否来决定。以电刷为例，如果电刷磨得比较光滑，使其能在换向器上保持良好而

平稳的接触，对无线电干扰的程度会显著的降低。曾经有人做过试验，同一台电机分别采用经过研磨和未经研磨的电刷，后一种情况对无线电的干扰程度是前一种情况的8倍。总而言之，一切不利换向过程的因素，如电机振动，电刷位置不对等，都会增大电机对无线电干扰的程度。

为了抑制对无线电的干扰，有两种可行的途径：（1）在接收设备方面采取防护措施，（2）对干扰源进行抑制。下面我们主要研究后面一种情况，即如何从电机这一方面来想办法，以减少它对无线电的干扰。

一、改善电机的换向过程

如前所述，产生无线电干扰的主要原因是电机换向过程中所产生的火花及电弧。如果电机的换向情况改善了，产生的火花及电弧比较小，当然对无线电干扰的程度就减轻了。有关改善换向过程的方法，在5—3节中已详细介绍，此地不再重复。

二、干扰源的屏蔽

实践经验告诉我们，金属机壳的全封闭式电机对无线电干扰的程度小，非封闭式电机以及塑料机壳的电机对无线电干扰的程度大。这是因为金属材料制成的全封闭式机壳是一个很好的金属屏蔽，阻止着电机产生的干扰场向周围空间发射。而非封闭式电机，其机座具有各种孔洞，不能有效的阻止干扰场向周围空间发射，至于塑料机壳本身不是金属，那就更起不到屏蔽的作用了。因此要阻止电机产生的干扰场向外发射，最好是采用全封闭式金属机壳。但是在换向这一章中我们又谈到，为了保证换向过程的顺利进行，空气中必须要有足够的氧气及适当的湿度，以利于在换向器表面形成氧

化亚铜及石墨和碳的润滑薄膜，所以单相串激电动机又不能做成封闭式。这两方面是矛盾的。从防止无线电干扰来看，最好是采用全封闭式的金属机壳，以阻止电机内部的干扰场向外发射；但从改善换向的角度来看，机壳又不能做成全封闭式的，以使空气中的氧气和潮气能进入电机内部。这个矛盾的解决办法，就是电机仍然采用非封闭式的金属机壳，以让空气能自由进入电机内部，而用比较密的铜网覆盖住机壳的通风孔，以达到金属屏蔽的目的。如果是塑料机壳，最好制造时在机壳内腔安置一个铜网或涂以金属粉，以使机壳金属化。

除了电机需要屏蔽以外，电机的引出线也应屏蔽，方法是将导线放在金属套管中，或者采用特殊的屏蔽电缆。导线的屏蔽套与机壳之间应该可靠地连接起来，它们之间的接触电阻不得大于2000微欧姆。

在某些情况下，伸到机壳外面的转轴也能把干扰场引向周围空间，这时转轴的轴伸就成为干扰的原因了。为了消除这种现象，必须借助于滑动接触把它与机壳可靠的联结起来。

为了防止无线电干扰，机壳应可靠地接地。

三、定子绕组对称接法

单相串激电动机绝大多数都是两极的，因此定子上有两个激磁绕组，这两个激磁绕组有两种可能的接法。图 8 — 4

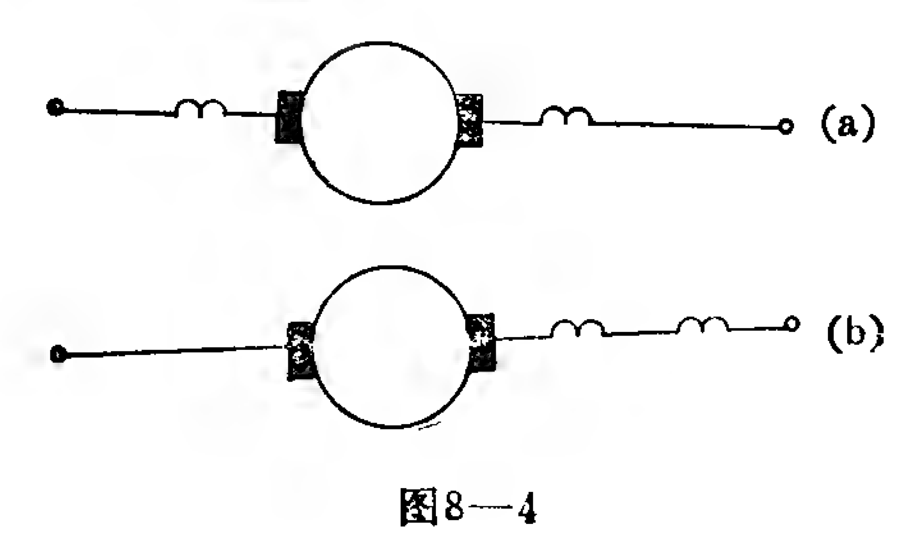


图8—4

（a）是对称接法，两个激磁绕组分别联接在转子的两边。图8—4（b）是非对称接法，两个激磁绕组同时联接在转子的一边。

这两个绕组不论是对称接法还是非对称接法，对电机的性能是没有什么影响的，但从抑制无线电干扰方面来看，差别却很大。因为当干扰沿着电源线向外传播的过程中，线路的阻抗对抑制干扰起着相当大的作用。线路阻抗大，干扰就小，线路阻抗小，干扰就大。定子的激磁绕组对于干扰来讲是一个阻抗很大的线圈。在对称接法时，电机的两根电源线都接有激磁绕组，都有一个很大的阻抗，不论干扰从那一根电源线传导出来，都要受到很大的抑制。但在非对称接法时〔图8—4（b)〕，接有激磁绕组的一端，阻抗大，干扰会受到很大的抑制，但对没有接激磁绕组的那一端来说，阻抗很小，由电源线传导出的干扰电压是比较高的。所以为了抑制无线电干扰，定子的激磁绕组最好采用图8—4（a）所表示的对称接法。试验结果也表明对称接法对无线电干扰的抑制就是比非对称接法好。

四、滤波

对于由电源线向外传播的干扰，也可以用图8—5（a）的方法，接入电容式滤波器来进行抑制。由于两根电源线都可以向外传播干扰，所以每一根电源线都应接入电容。如果电枢绕组的一个端头已接在机壳上，则干扰只能从另一个端头向外传播，这种情况下，只要在这个端头接上滤波电容就行了〔图8—5（b)〕。电容量的大小一般约在0.1—1微法之间，具体数值用试验方法来决定。应优先选用电感系数比较小的穿心式电容。如果电容滤波达不到所需的干扰抑制程

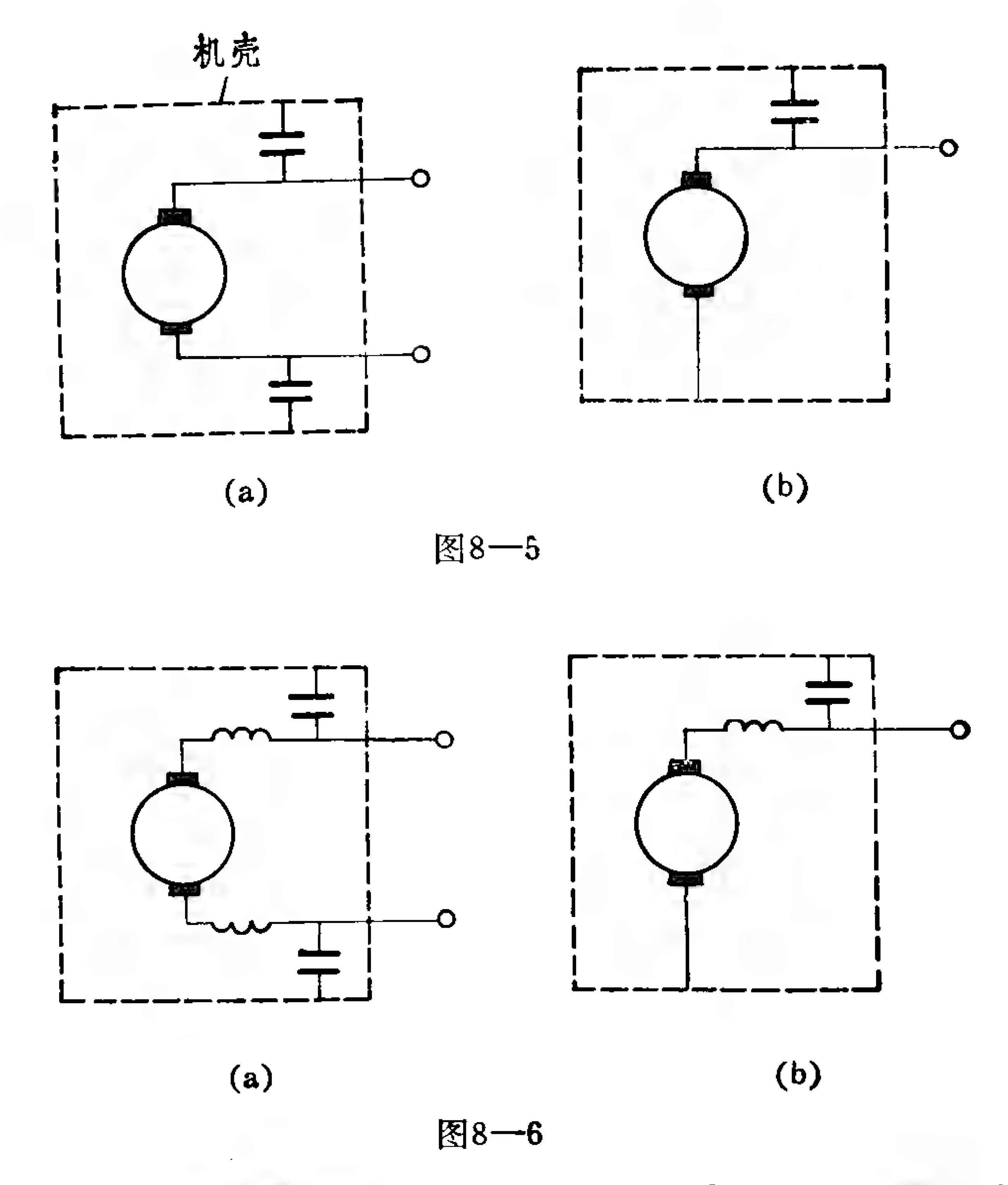


图8—5

图8—6

度，可附加电感量约为50—500微亨的高频扼流圈，它与电容器一道组成电感——电容滤波器（图8—6）。有关滤波器的工作原理，请查阅电子学方面书籍，此地不再介绍了。

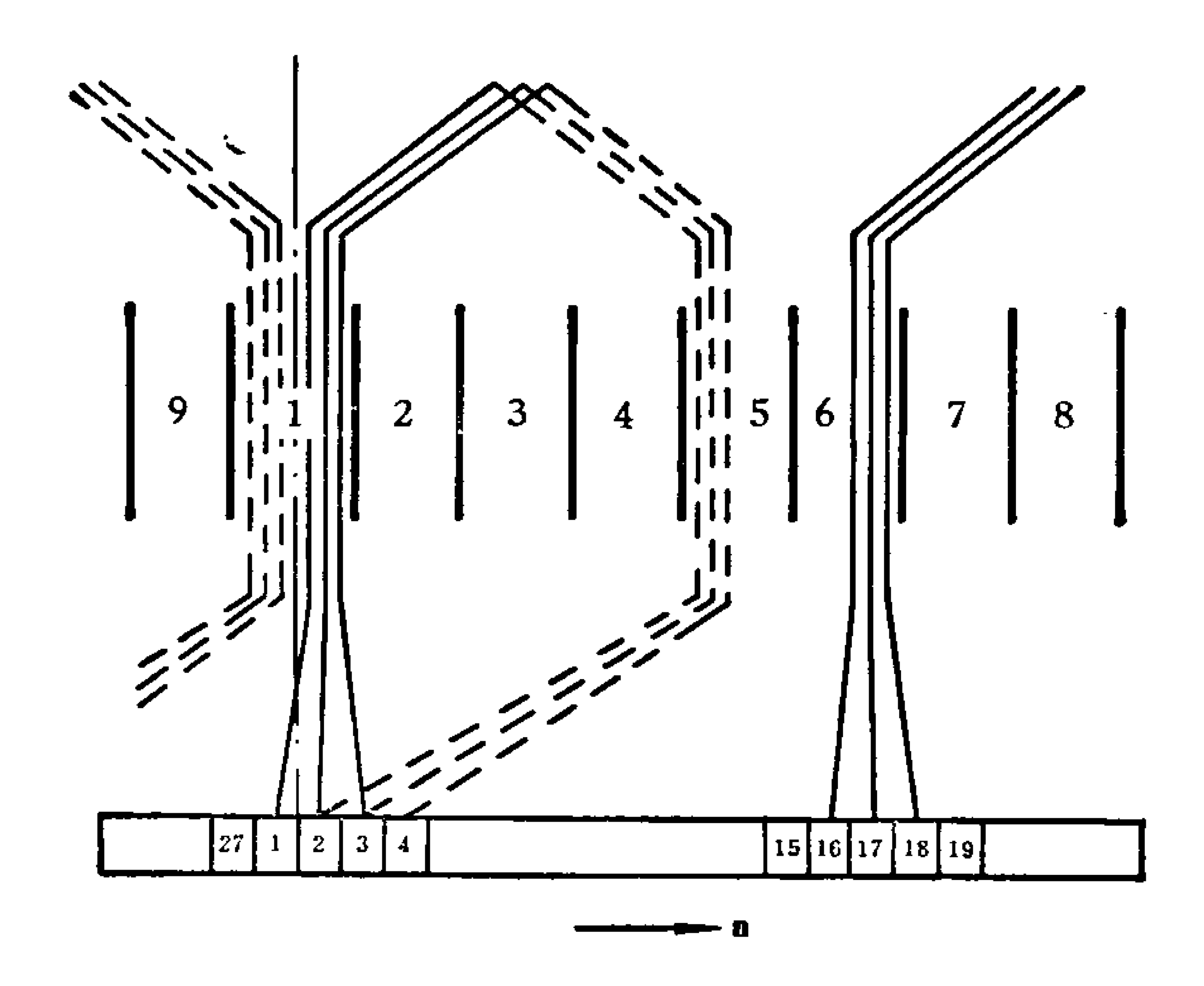
串激电动机工作时不仅对无线电广播、电视及无线电通讯产生干扰，而且对附近工作的电子仪器也产生干扰。目前，电子设备都向微型化方向发展，电子设备的功率很小，讯号也很弱，电机工作时对其产生干扰的可能性就更大了。

钻头直径(毫米)	型号	主要性能 电压(伏)	电流(安)	转速(转/分)	效率(%)	功率因数	结构数据 定子外径(毫米)	定子内径(毫米)	铁心长度(毫米)	气隙长度(毫米)	转子槽数	定子每极匝数	转子每元件匝数	每槽导体数
6	J1Z-6	36	5.6	10000	43	0.92	61	35.3	34	0.35	9	42	7	42
		110	2.2	13500	48	0.92	61	35.3	34	0.35	9	128	19	114
		220	1.1	13500	48	0.92	61	35.3	34	0.35	9	255	38	228
10	J1Z-10	24	12	9900	45	0.92	73	41	40	0.35	12	22	4.5	18
		36	7.3	9900	45	0.92	73	41	40	0.35	12	35	6.5	26
		110	2.5	10300	50	0.94	73	41	40	0.35	12	96	13	78
		220	1.2	10300	50	0.94	73	41	40	0.35	12	198	26	156
13	J1Z-13	36	11	7000	47	0.95	85	46.3	45	0.4	12	25	6	24
		110	4.4	10000	55	0.95	85	46.3	45	0.4	12	95	9	54
		220	2.2	10000	55	0.95	85	46.3	45	0.4	12	190	18	108
		240	2.1	10000	55	0.95	85	46.3	45	0.4	12	190	20	120
19	J1Z-19	110	7.2	9000	56	0.92	102	58.7	46	0.5	15	60	9	36
		220	3.6	9000	56	0.92	102	58.7	46	0.5	15	120	12	72
23	J1Z-23	220	5.1	8100	56	0.92	102	58.7	46	0.5	15	120	12	72

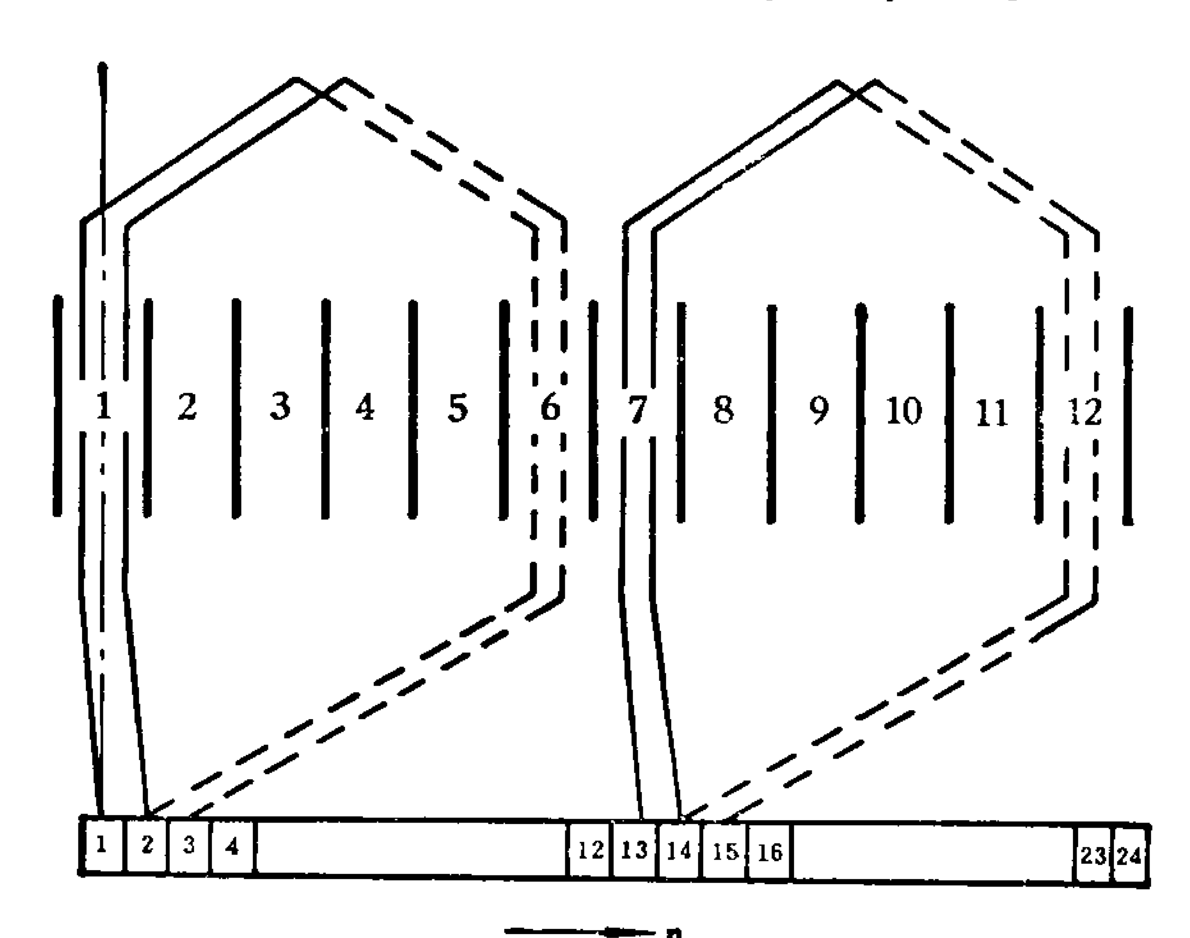
术数据（老系列）

绕组数据							电磁负荷			
转子总导体数	换向器片数	实槽节距	定子线规	转子线规	定转子匝数比	转子绕组图	压降系数 ke	气隙磁密(高斯)	定子电密（安/毫米²）	转子电密（安/毫米²）
378	27	4	2×0.55	2×0.41	0.444	附图-1	0.658	磁密范围在（4000—5000）高斯之间	11.7	10.6
1026	27	4	0.47	0.33	0.5	附图-1	0.68		12.65	12.8
2052	27	4	0.33	0.23	0.5	附图-1	0.68		12.8	13.2
216	24	5	3×0.69	0.41 0.69	0.406	附图-2	0.666		10.65	11.85
312	24	5	2×0.69	0.69	0.446	附图-2	0.666		9.75	9.75
936	36	5	0.55	0.38	0.41	附图-3	0.704		10.5	11
1872	36	5	0.38	0.27	0.423	附图-3	0.704		10.55	10.45
288	24	5	3×0.72	0.53 0.67	0.35	附图-4	0.697		9	9.57
648	36	5	0.67	0.53	0.585	附图-5	0.735		12.4	9.9
1296	36	5	0.51	0.38	0.586	附图-5	0.735		10.8	9.6
1440	36	5	0.51	0.38	0.527	附图-5	0.735		10.3	9.2
540	30	6	3×0.62	2×0.47	0.444	附图-6	0.716		7.9	10.3
1080	45	6	2×0.55	0.47	0.444	附图-7	0.716		7.55	10.3
1080	45	6	2×0.57	0.53	0.444	附图-8	0.716		10	11.5

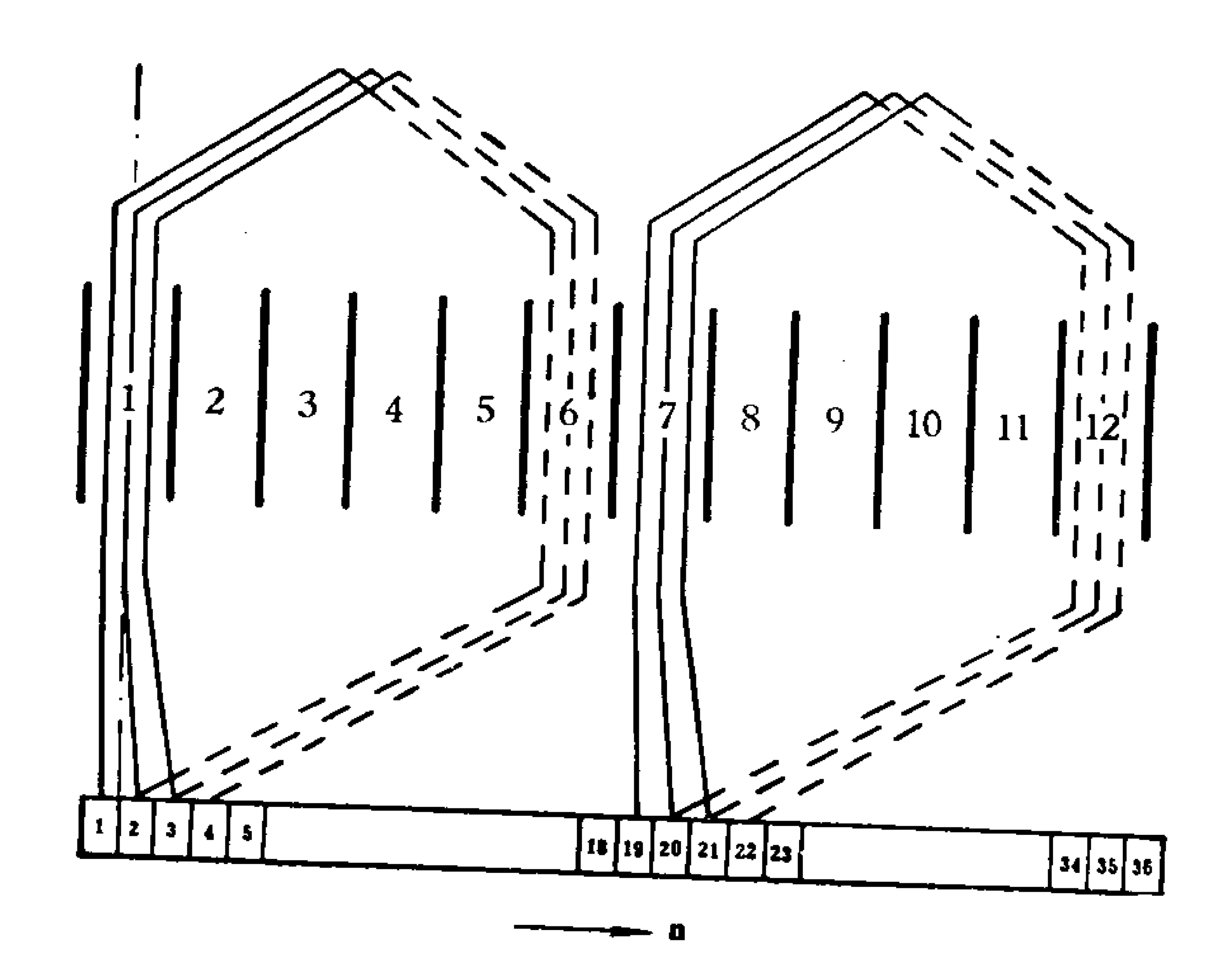
附图 1—8 JlZ 系列电钻转子绕组图



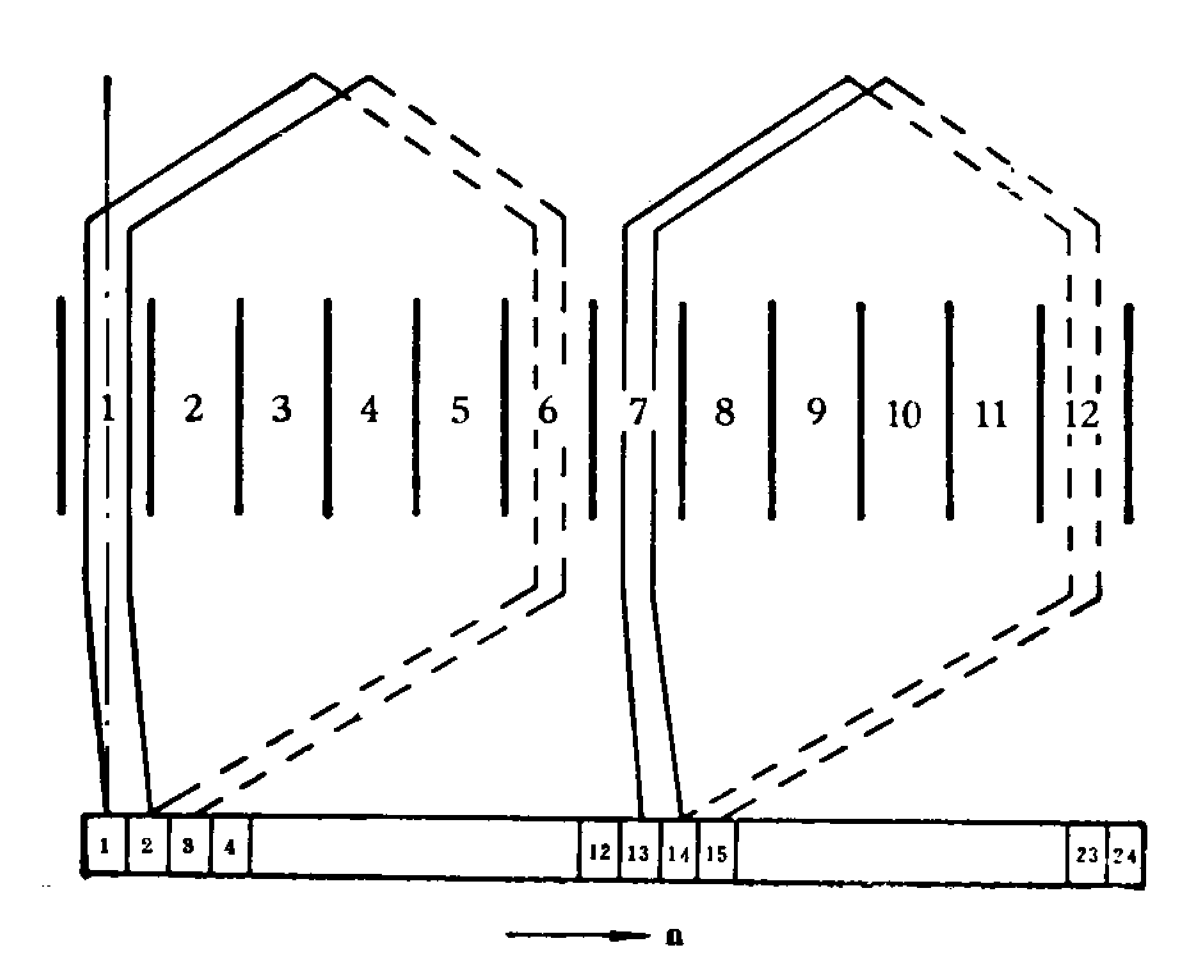
附图—1 J1Z—6 u=36、110、220伏



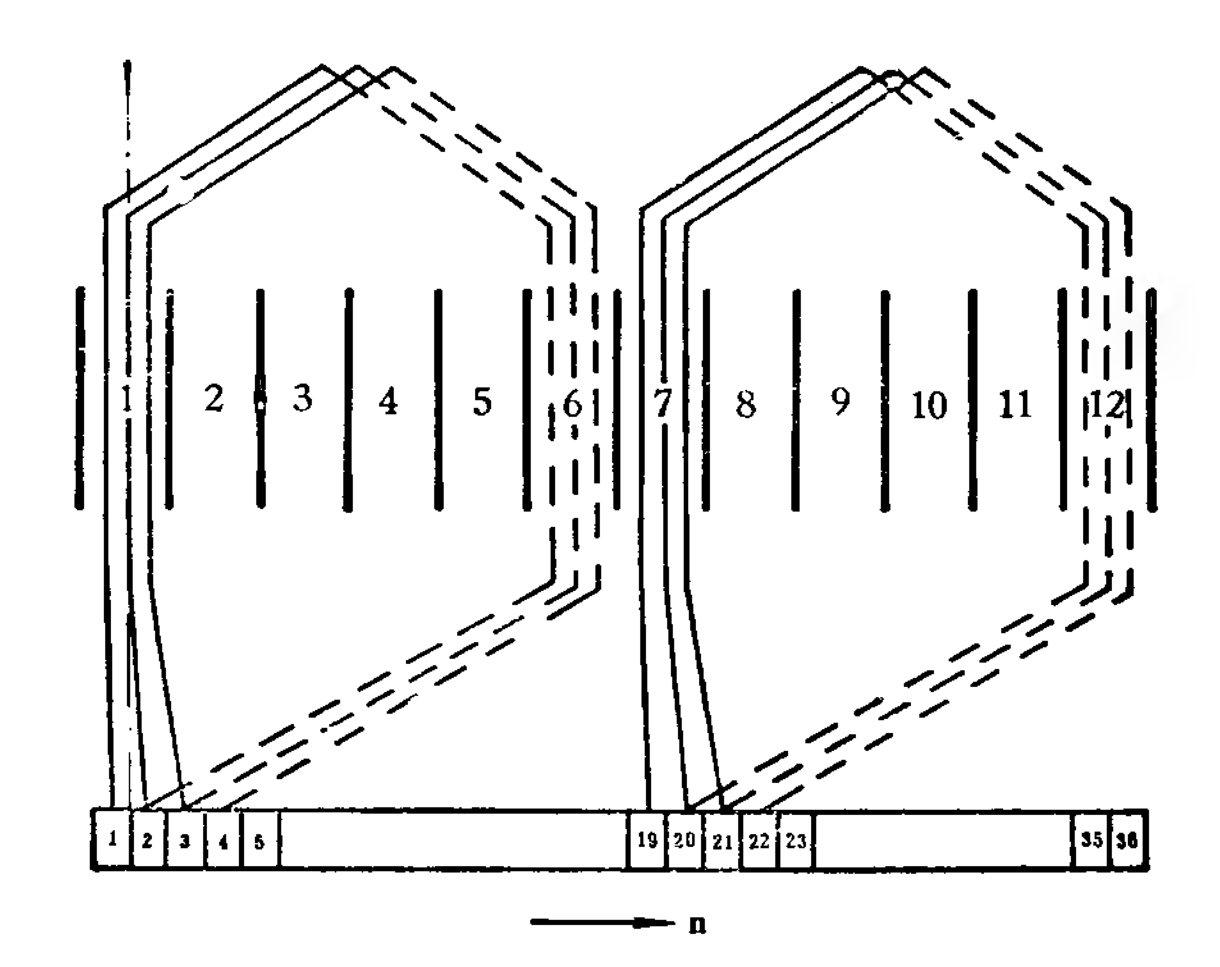
附图—2 J1Z—10 u=24、36伏



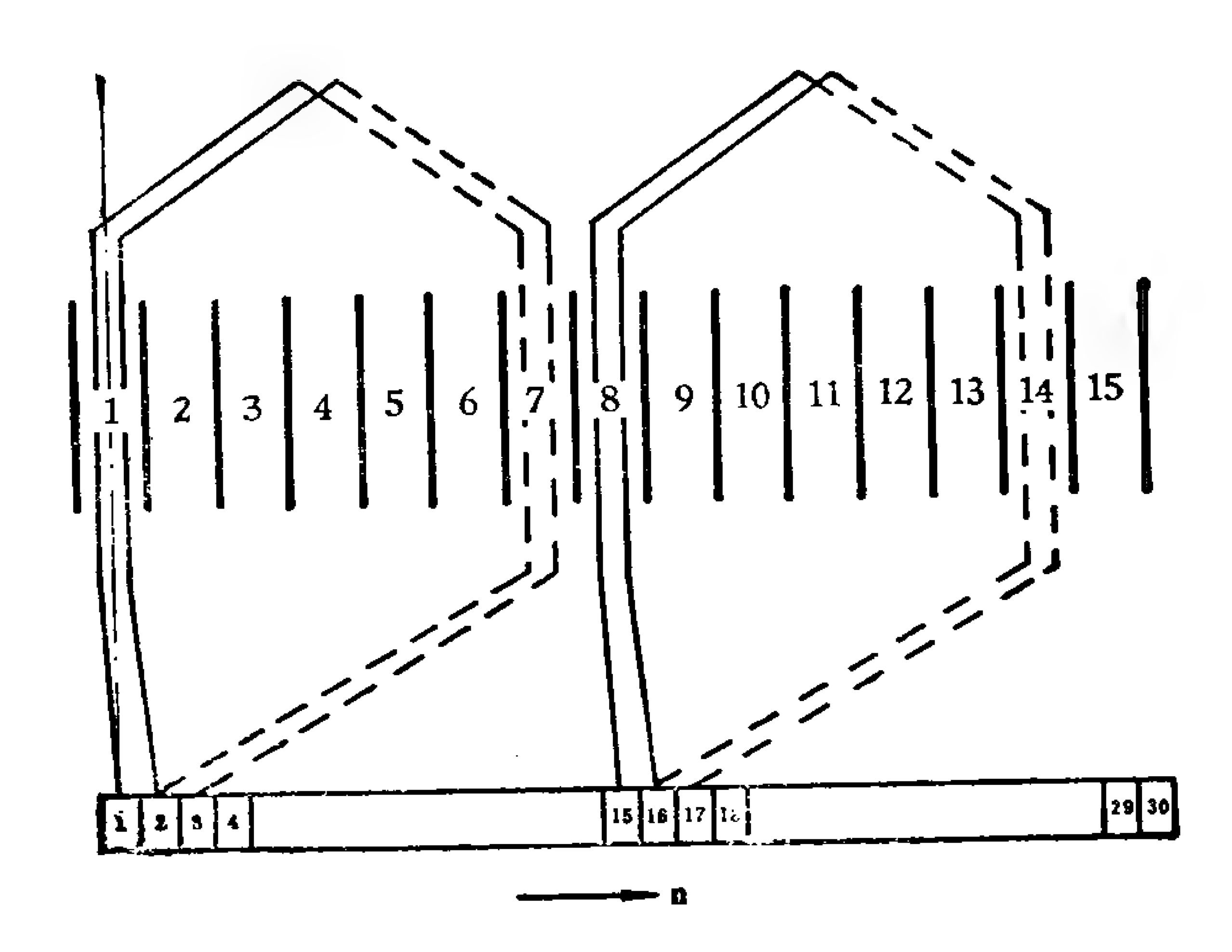
附图—3　J_1Z—10　u＝110、220伏



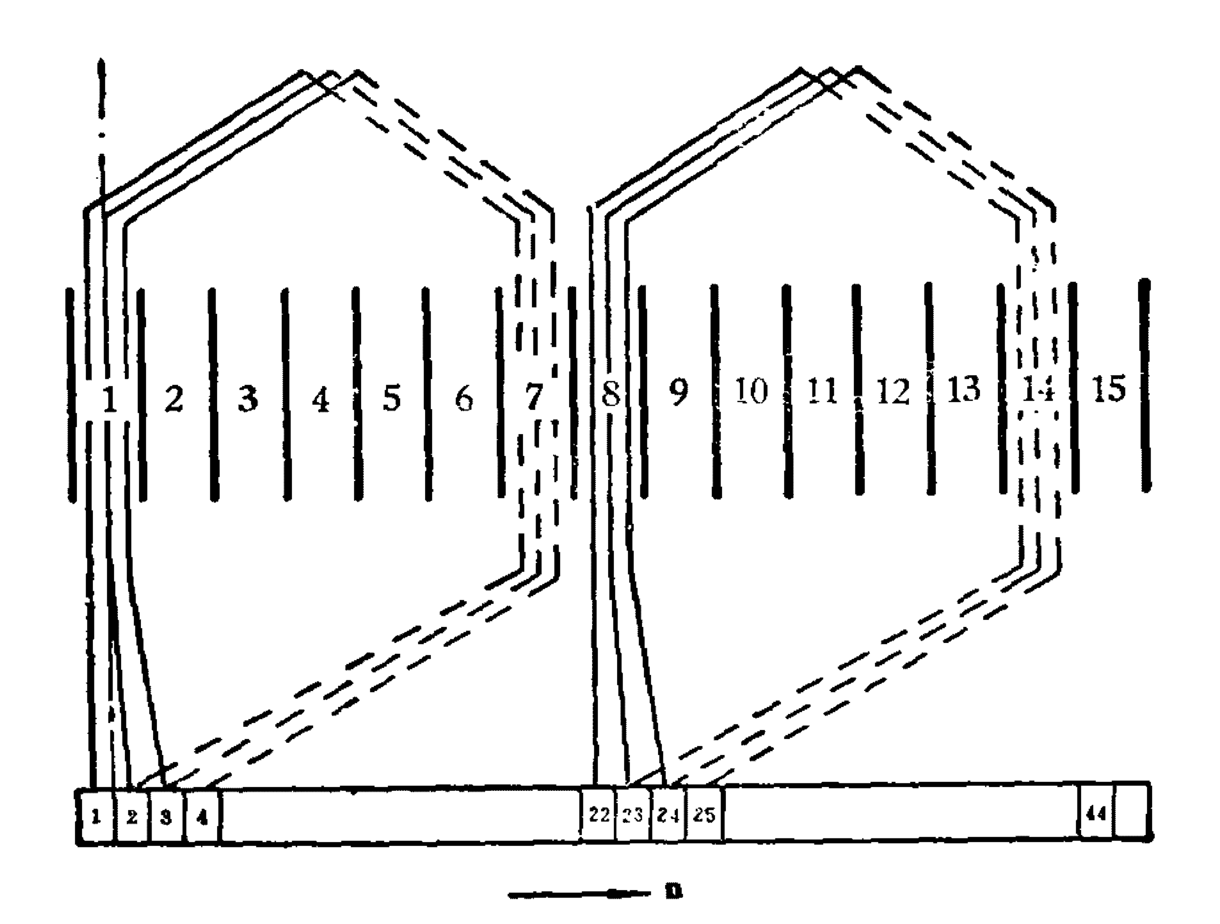
附图—4　J_1Z—13　u＝36伏



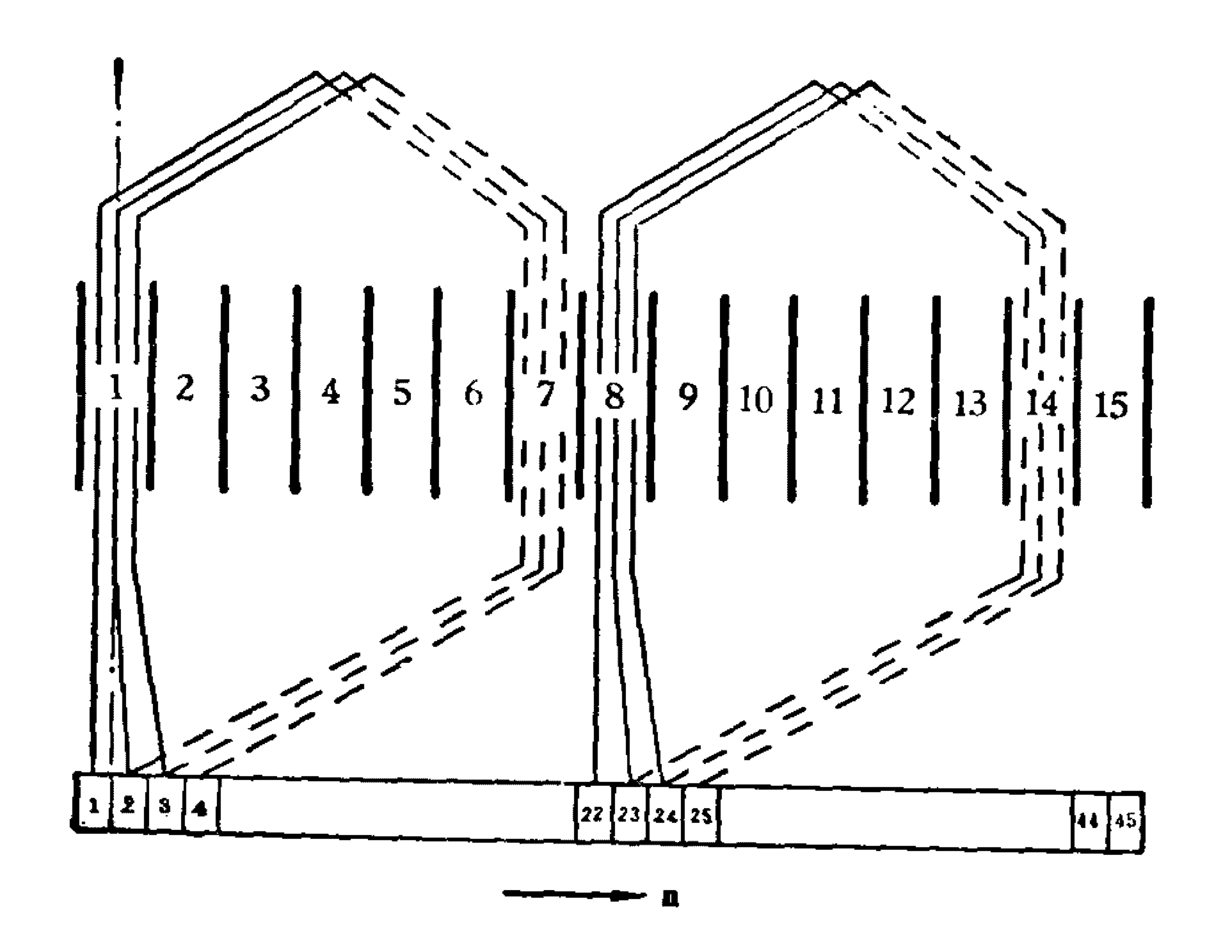
附图—5　J1Z—13　u＝110、220、240伏



附图—6　J1Z—19　u＝110伏



附图—7　J1Z—19　u=220伏



附图—8　J1Z—23　u=220伏

附表—2　　**DT 系列电动工具用串激电动机技术数据**　　（1966年设计）

定子冲片外径（毫米）	型号	主要性能：输出功率（瓦）	主要性能：电流（安）	主要性能：转矩（公斤—厘米）	主要性能：转速（转/分）	主要性能：效率（%）	主要性能：功率因数	结构数据：定子外径（毫米）	结构数据：转子外径（毫米）	结构数据：铁心长度（毫米）	结构数据：气隙长度（毫米）	结构数据：转子槽数	结构数据：极弧系数	绕组数据：定子每极匝数 W_1	绕组数据：转子每元件匝数	绕组数据：转子每槽导体数
50	DT21	60	0.679	0.418	14000	41	0.98	50	28.3	28	0.35	9	0.667	323	50	300
	DT22	90	0.879	0.626		48	0.97	50	28.3	34	0.35	9		286	41	246
	DT23	120	1.07	0.836		52.5	0.97	50	28.3	42	0.35	9		239	33	198
	DT23s	120	1.07	0.836		52.5	0.97	50	28.1	42	0.45	9		222	33	198
56	DT31	120	1.073	0.9	13000	53	0.96	56	30.3	38	0.35	9	0.667	237	36	216
	DT32	150	1.232	1.125		57	0.95	56	30.3	42	0.35	9		218	32	192
	DT31s	120	1.05	0.9		53.5	0.97	56	30.1	38	0.45	9		224	36	216

	DT41	150	1.242	1.218		57	0.965	62	34.2	32	0.4	9		252	37	222
62	DT42	180	1.421	1.462	12000	60	0.96	62	34.2	36	0.4	9	0.667	227	33	198
	DT42s	180	1.403	1.462		60	0.97	62	34	36	0.5	9		224	33	198
	DT51	210	1.569	1.86		61	0.95	71	38.1	38	0.45	11		191	24	144
71	DT52	250	1.95	2.215	11000	62.7	0.93	71	38.1	44	0.45	11	0.667	167	21	126
	DT51s	210	1.52	1.86		62	0.965	71	37.8	38	0.6	11		197	24	144
	DT61	300	2.318	2.925		64	0.92	80	44	38	0.5	11		168	22	132
80	DT62	350	2.62	3.41	10000	66	0.92	80	44	42	0.5	11	0.667	154	20	120
	DT61s	300	2.3	2.925		64.5	0.92	80	43.7	38	0.65	11		165	22	132
	DT71	400	3.03	4.33		66	0.91	90	49.8	44	0.6	19		144	16	64
90	DT72	500	3.72	5.41	9000	68	0.90	90	49.8	52	0.6	19	0.684	133	13	52
	DT71s	400	3.06	4.33		65.5	0.91	90	49.5	44	0.75	19		144	16	64
	DT81	600	4.44	7.31		69	0.89	102	56.6	48	0.7	19		116	14	56
102	DT82	800	5.95	9.75	8000	71	0.87	102	56.6	64	0.7	19	0.684	96	10	40
	DT81s	600	4.39	7.31		69	0.9	102	56.3	48	0.85	19		112	14	56

续附表—2　　DT 系列电动工具用串激电动机技术数据　　(1966年设计)

定子冲片外径（毫米）	型号	绕组数据						电磁负荷						
		转子总导体数 N	元件数或换向器片数	实槽节距	定子线规	转子线规	槽满率 (%)	定转子匝数比 $\frac{4W_1}{N}$	气隙磁密（高斯）	定子电密（安/毫米²）	转子电密 J（安/毫米²）	线负荷 A	热负荷 AJ	压降系数 Ke
50	DT21	2700	27	4	0.27	0.18	71.2	0.478	3870	13.06	14.8	113.4	1667	0.69
	DT22	2214	27	4	0.31	0.21	75.4	0.517	3925	12.82	13.98	120.2	1680	0.718
	DT23	1782	27	4	0.33	0.23	76	0.538	3950	13.78	14.2	118	1675	0.74
	DT23s	1782	27	4	0.33	0.23	76	0.498	4023	13.78	14.2	119	1690	0.74
56	DT31	1944	27	4	0.33	0.23	75.2	0.487	4060	13.8	14.2	120.5	1711	0.734
	DT32	1728	27	4	0.38	0.25	76.8	0.504	4150	12.26	14.11	125.8	1775	0.745
	DT31s	1944	27	4	0.33	0.23	75.2	0.461	4180	13.5	13.92	120.5	1655	0.744

62	DT41	1998	27	4	0.38	0.25	74.2	0.505	4430	12.05	13.89	127.3	1485	0.757
	DT42	1782	27	4	0.41	0.27	75.2	0.51	4450	11.82	13.65	129.5	1768	0.768
	DT42s	1782	27	4	0.41	0.27	75.3	0.504	4610	11.71	13.5	129	1742	0.775
71	DT51	1584	33	5	0.47	0.31	72.5	0.482	4820	10.45	12	120	1440	0.765
	DT52	1386	33	5	0.49	0.35	70.7	0.482	4860	11.4	12.52	124.2	1556	0.756
	DT51s	1584	33	5	0.47	0.31	72.5	0.498	4940	10.14	11.64	117	1362	0.78
80	DT61	1452	33	5	0.55	0.38	68	0.463	4900	10.76	11.29	134	1510	0.754
	DT62	1320	33	5	0.57	0.41	70.3	0.466	4930	11.3	10.9	137.5	1500	0.764
	DT61s	1452	33	5	0.55	0.38	67.8	0.454	5025	10.65	11.18	133.5	1493	0.756
90	DT71	1216	38	9	0.62	0.44	70.8	0.474	4860	11.05	10.9	129.5	1410	0.755
	DT72	988	38	9	2×0.49	0.49	69.5	0.54	5010	10.86	10.86	129	1401	0.755
	DT71s	1216	38	9	0.62	0.44	70.8	0.474	5060	11.75	11.08	132	1459	0.753
102	DT81	1064	38	9	2×0.55	0.57	70.4	0.435	4980	10.31	9.58	146.5	1403	0.751
	DT82	760	38	9	2×0.62	2×0.47	69	0.505	5125	10.78	9.38	138.5	1300	0.744
	DT81s	1064	38	9	2×0.55	0.57	70.4	0.421	5170	10.2	9.48	145.5	1380	0.76

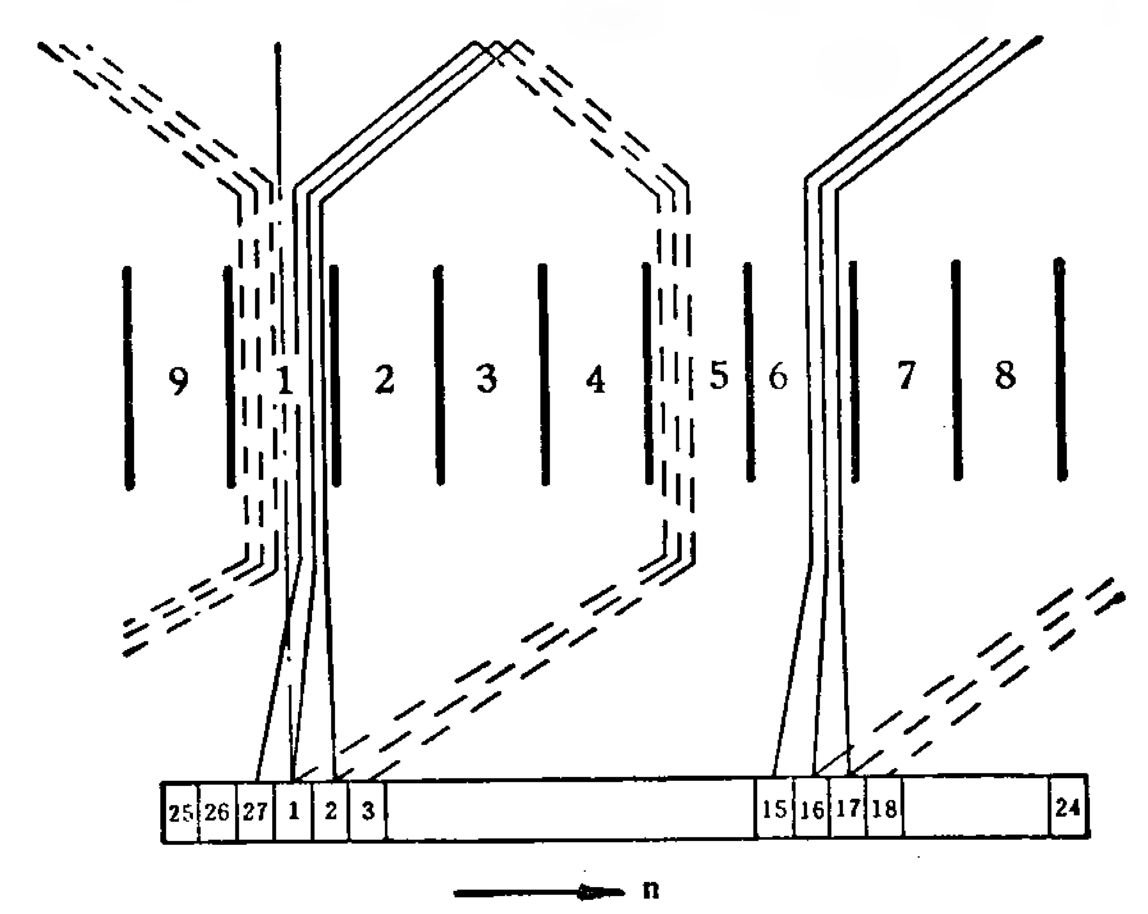
附表—3　电动工具用交直流两用串激电动机技术数据　（1974年设计）

定子冲片外径（毫米）	主要性能					结构数据						转子绕组面
	输出功率（瓦）	电流（安）	转速（转/分）	效率（%）	功率因数	定子外径（毫米）	定子内径（毫米）	铁心长度（毫米）	磁极宽度（毫米）	气隙长度（毫米）	转子槽数	
ф56	140	1	14000	60	0.965	56	31	38	24	0.35	9	附图—9
	204	1.57	14300	62.3	0.952	56	31	50	24	0.35	9	
ф71	275	2.1	12100	63.8	0.939	71	39	44	31	0.45	11	附图10及11
	385	2.71	13200	68	0.955	71	39	52	31	0.45	11	
ф90	550	4.1	9900	68.2	0.917	90	51	52	38	0.6	19	附图—12
	770	5.42	13200	69	0.936	90	51	52	38	0.6	19	
	1250	8.05	12500	75	0.94	90	51	76	38	0.6	19	

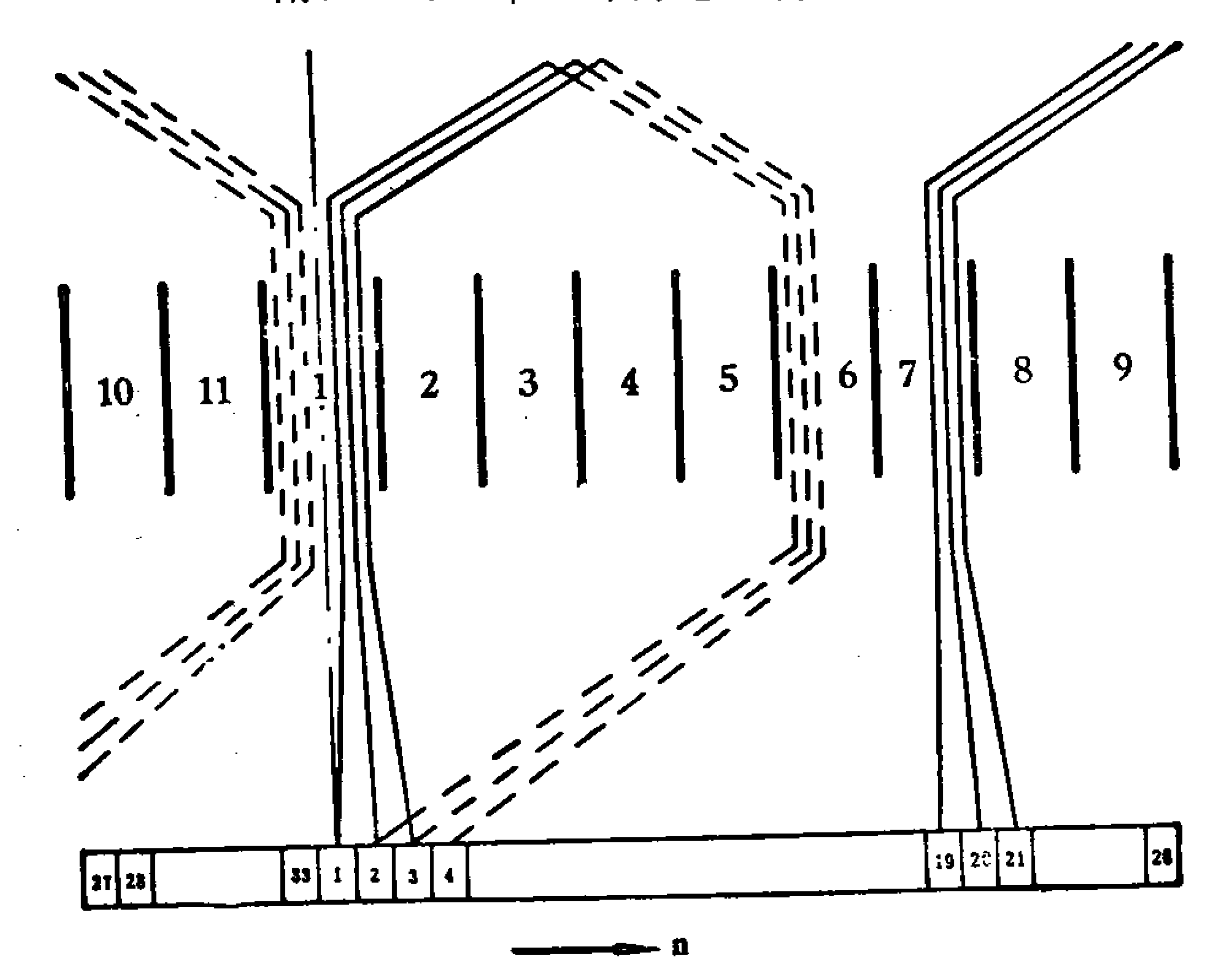
定子冲片外径（毫米）	绕组数据									电磁负荷				
	定子每极匝数 $\overline{W}_1$	转子每元件匝数	转子总导体数 N	元件数或换向器片数	实槽节距	定子线规	转子线规	槽满率 (%)	定转子匝数比 $\frac{4W_1}{N}$	气隙磁密（高斯）	定子极身磁密（高斯）	定子电密（安/毫米^2）	转子电密（安/毫米^2）	压降系数 Ke
ϕ56	247	36	1944	27	4	0.33	0.23	78.5	0.507	4320	6470	12.85	13.25	0.772
	197	27	1458	27	4	0.38	0.27	76.8	0.54	4280	6410	13.9	13.72	0.772
ϕ71	185	20	1320	33	5	0.49	0.33	67.5	0.56	5110	7460	11.18	12.3	0.764
	138	17	1122	33	5	0.55	0.38	76.8	0.492	4940	7210	11.41	12	0.802
ϕ90	134	13	988	38	9	2×0.49	0.49	69.59	0.54	5170	8250	10.86	10.86	0.771
	116	10	760	38	9	2×0.55	0.57	72.5	0.61	5340	8530	11.5	10.6	0.79
	80	8	608	38	8	2×0.64	0.64	73.4	0.526	5361	8420	12.56	12.53	0.822

注：在所有绕组图形中（附图一9、10、11、12），都是槽中心对准换向器片中心。

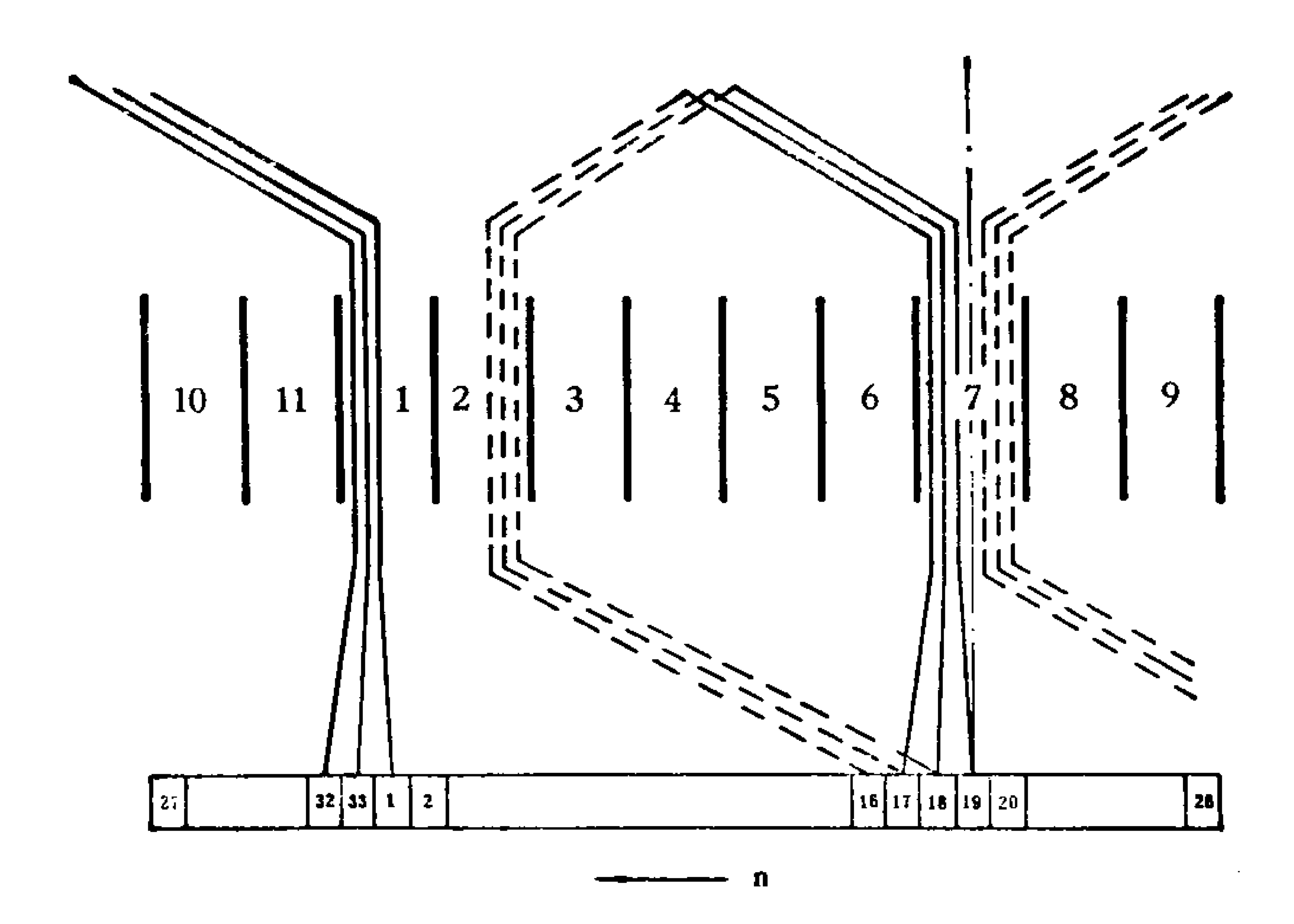
附图 9—12　电动工具用交直流两用串激电动机转子绕组图



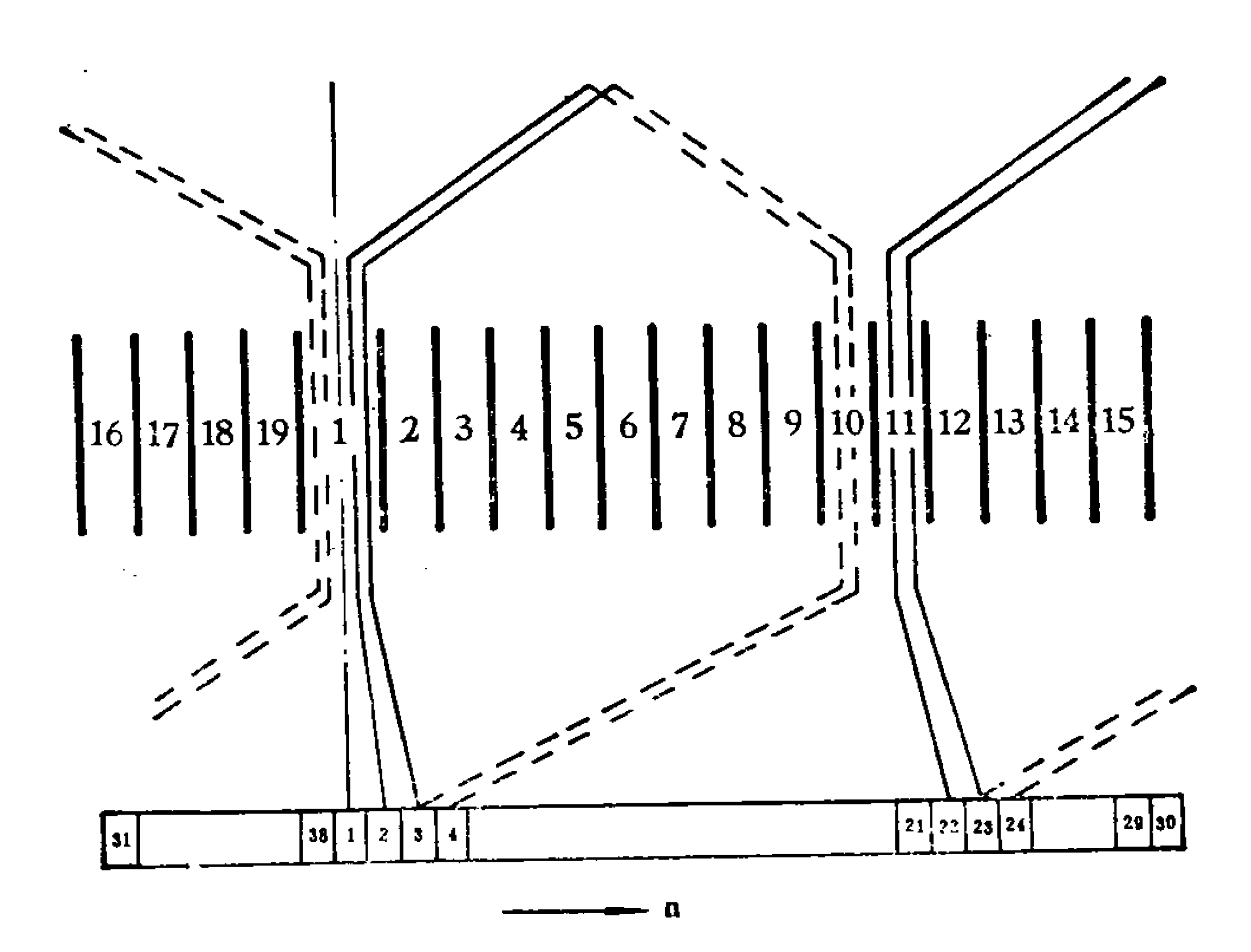
附图—9　φ56 冲片电机转子绕组



附图—10　φ71 冲片电机转子绕组



附图—11　φ71 冲片电机转子绕组



附图—12　φ90 冲片电机转子绕组

附表—4

电动工具选配电机汇总表

P_2—输出功率(瓦)，n—转速（转/分）

冲片	电动机	电钻	直向砂轮机	角向磨光机	曲线锯
φ56	$p_2=140$ $n=14000$ (13000)	4毫米电钻 $p_2=120$ $n=2200$ 6毫米电钻 $p_2=120$ $n=1200$	φ25 $p_2=120$ $n_0=22000$		3毫米 $p_2=120$ 剪切频率 为3000次/分
	$p_2=204$ $n=14300$ (13000)			φ100 $p_2=185$ $n_0=11000$	
φ71	$p_2=275$ $n=12100$ (11000)	10毫米电钻 $p_2=230$ $n=700$ 13毫米电钻 $p_2=230$ $n=500$	φ80 $p_2=230$ $n_0=11000$		
	$p_2=385$ $n=13200$ (12000)		φ100 $p_2=325$ $n_0=8500$ φ125 $p_2=325$ $n_0=6900$	φ125 $p_2=325$ $n_0=11000$	

续附表—4

冲片	电动机	电钻	直向砂轮机	角向磨光机	曲线锯
$\phi 90$	$p_2=550$ $n=9900$ (9000)	16毫米电钻 $p_2=450$ $n=500$ 19毫米电钻 $p_2=450$ $n=330$ 23毫米电钻 $p_2=450$ $n=250$			
	$p_2=770$ $n=13200$ (12000)		$\phi 150$ $p_2=700$ $n_0=5700$		
	$p_2=1250$ $n=12500$			$\phi 180$ $p_2=1100$ $n_0=8000$ $\phi 230$ $p_2=1100$ $n_0=6000$	

附表—5 线 规

直径（毫米）	标称截面（毫米²）	直径（毫米）	标称截面（毫米²）	直径（毫米）	标称截面（毫米²）	直径（毫米）	标称截面（毫米²）
0.05	0.00196	0.31	0.0755	0.83	0.541	1.81	2.57
0.06	0.00283	0.33	0.0855	0.86	0.581	1.88	2.78
0.07	0.00385	0.35	0.0962	0.90	0.636	1.95	2.99
0.08	0.00502	0.38	0.1134	0.93	0.679	2.02	3.20
0.09	0.00637	0.41	0.1320	0.96	0.724	2.10	3.46
0.10	0.00785	0.44	0.1521	1.00	0.785	2.26	4.01
0.11	0.00950	0.47	0.1735	1.04	0.849	2.44	4.68
0.12	0.01131	0.49	0.1886	1.08	0.916	2.63	5.43
0.13	0.01325	0.51	0.204	1.12	0.985	2.83	6.29
0.14	0.01537	0.53	0.221	1.16	1.057	3.05	7.31
0.15	0.01767	0.55	0.238	1.20	1.131	3.28	8.45
0.16	0.0201	0.57	0.255	1.25	1.227	3.53	9.79
0.17	0.0227	0.59	0.273	1.30	1.327	3.8	11.34
0.18	0.0255	0.62	0.302	1.35	1.431	4.1	13.2
0.19	0.0284	0.64	0.322	1.40	1.539	4.5	15.9
0.20	0.0314	0.67	0.353	1.45	1.651	4.8	18.1
0.21	0.0346	0.69	0.374	1.50	1.767	5.2	21.25
0.23	0.0415	0.72	0.407	1.56	1.911	5.5	23.75
0.25	0.0491	0.74	0.430	1.62	2.06	6.0	28.3
0.27	0.0573	0.77	0.466	1.68	2.22	6.5	33.2
0.29	0.0661	0.80	0.503	1.74	2.38	7.0	38.5

附表—6　　U型单相串激电动机技术数据

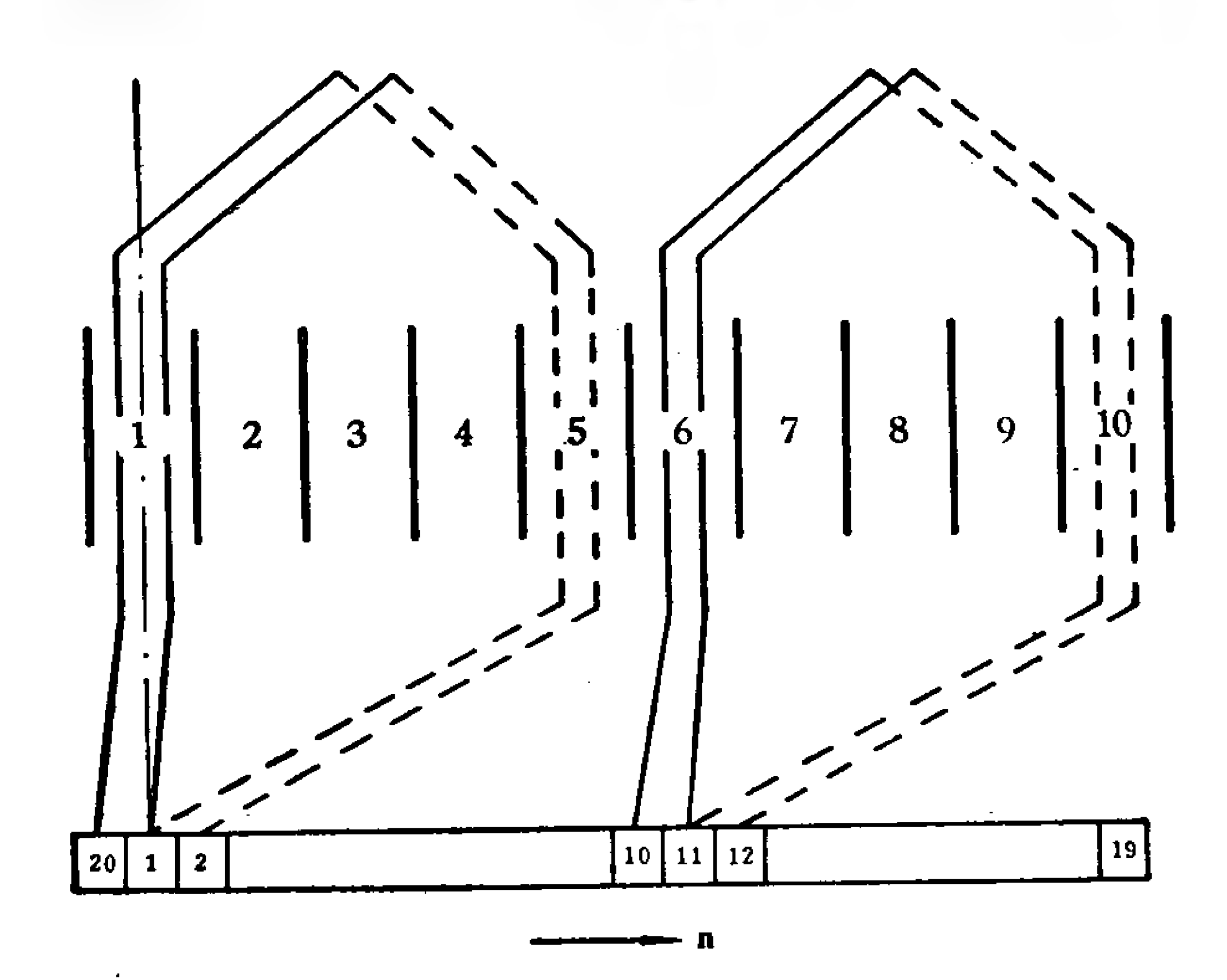
型号	主要性能			结构数据				绕组数据										
	功率(瓦)	电压(伏)	转速(转/分)	定子外径(毫米)	定子内径(毫米)	铁心长度(毫米)	气隙长度(毫米)	转子槽数	定子每极匝数 W_1	转子每元件匝数	转子每槽导体数	转子总导体数 N	元件数或换向片数	实槽节距	定子线规	转子线规	定转子匝数比 $\frac{4W_1}{N}$	转子绕组图形*
U15/40—220	15	220	4000	65	33.5	36	0.45	10	740	110	440	4400	20	4	0.2	0.15	0.672	附图—13
U15/56—220D	15	220	5600	55	29	22	0.35	10	600	110	440	4400	20	4	0.19	0.13	0.545	附图—13
U30/40—220	30	220	4000	84	45.3	25	0.45	12	575	62	372	4464	36	5	0.25	0.18	0.515	附图—14
U40/36—24D	40	24	3600	84	45.3	38	0.45	12	76	7	28	336	24	5	0.86	0.64	0.905	附图—16
U40/36—110D	40	110	3600	84	45.3	38	0.45	12	350	34	136	1632	24	5	0.41	0.33	0.856	附图—16
U55/45—220D	55	220	4500	84	45.3	38	0.45	12	360	50	200	2400	24	5	0.38	0.25	0.6	附图—17
U80/50—110D	80	110	5000	84	45.3	60	0.45	12	220	13	78	936	36	5	0.49	0.41	0.94	附图—15
U80/50—220D	80	220	5000	84	45.3	60	0.45	12	435	27	162	1944	36	5	0.35	0.29	0.895	附图—15
U120/40—220	120	220	4000	94	51.6	60	0.55	16	220	23	138	2208	48	7	0.44	0.31	0.4	附图—18
U180/40—220	180	220	4000	94	51.6	75	0.55	16	160	20	120	1920	48	7	0.53	0.35	0.334	附图—18

* 在各绕组图中，槽1中心均对准换向器片1中心。详见附图—13、14、15、16、17、18.

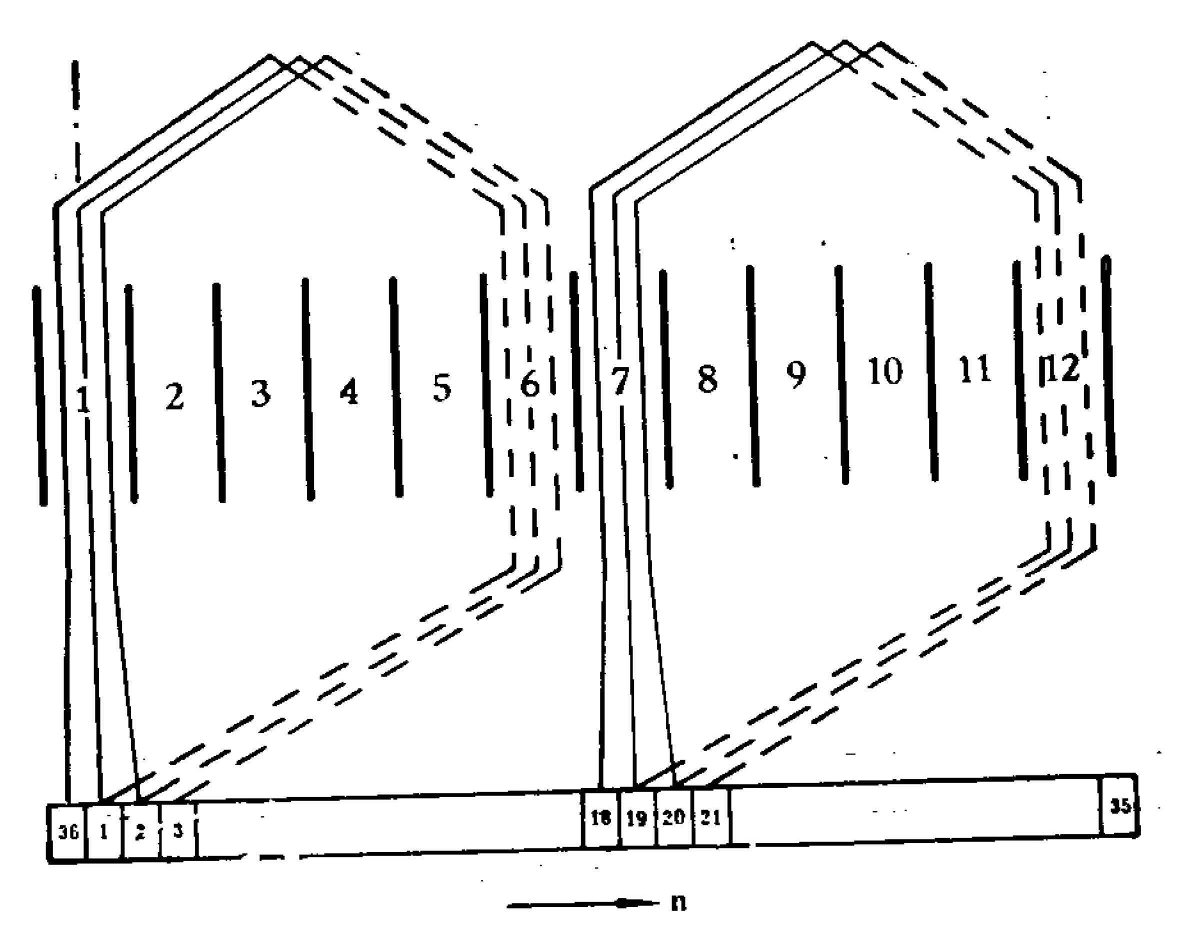
附表—7 **SU型交直流两用串激电动机技术数据**

型号	主要性能								结构数据					绕组数据											
	电压（伏）		输出功率（瓦）		转矩（克—厘米）		转速（转/分）	轴伸数	定子外径（毫米）	定子内径（毫米）	铁心长度（毫米）	气隙长度（毫米）	转子槽数	定子磁极交流匝数	定子磁极直流增加匝数	定子磁极总匝数	转子每元件匝数	转子每槽导体数	转子总导体数	元件数或换向器片数	实槽节距	转子线规	定子线规		转子绕组图形
	交流	直流	交流	直流	交流	直流																	交流	直流	
SU—1	110	110	80	100	3100	3900	2500	1	94	51.6	60	0.55	16	111	209	320	12	72	1152	48	7	0.47	0.62	0.49	附图—19
SU—1C								2																	
SU—2	220	220						1						219	441	660	25	150	2400			0.33	0.44	0.35	
SU—2C								2																	

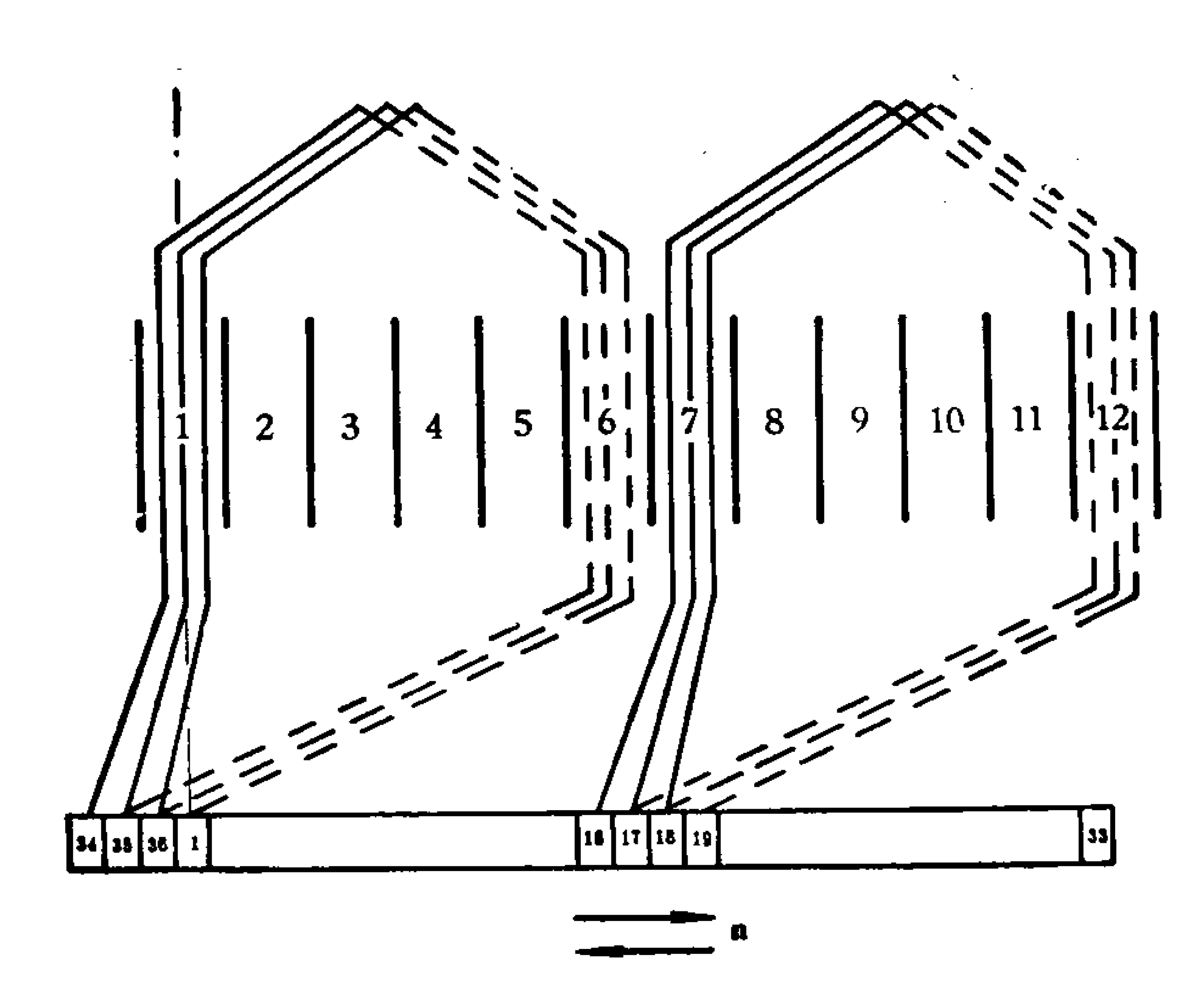
附图13—19 U型及SU型串激电动机转子绕组图



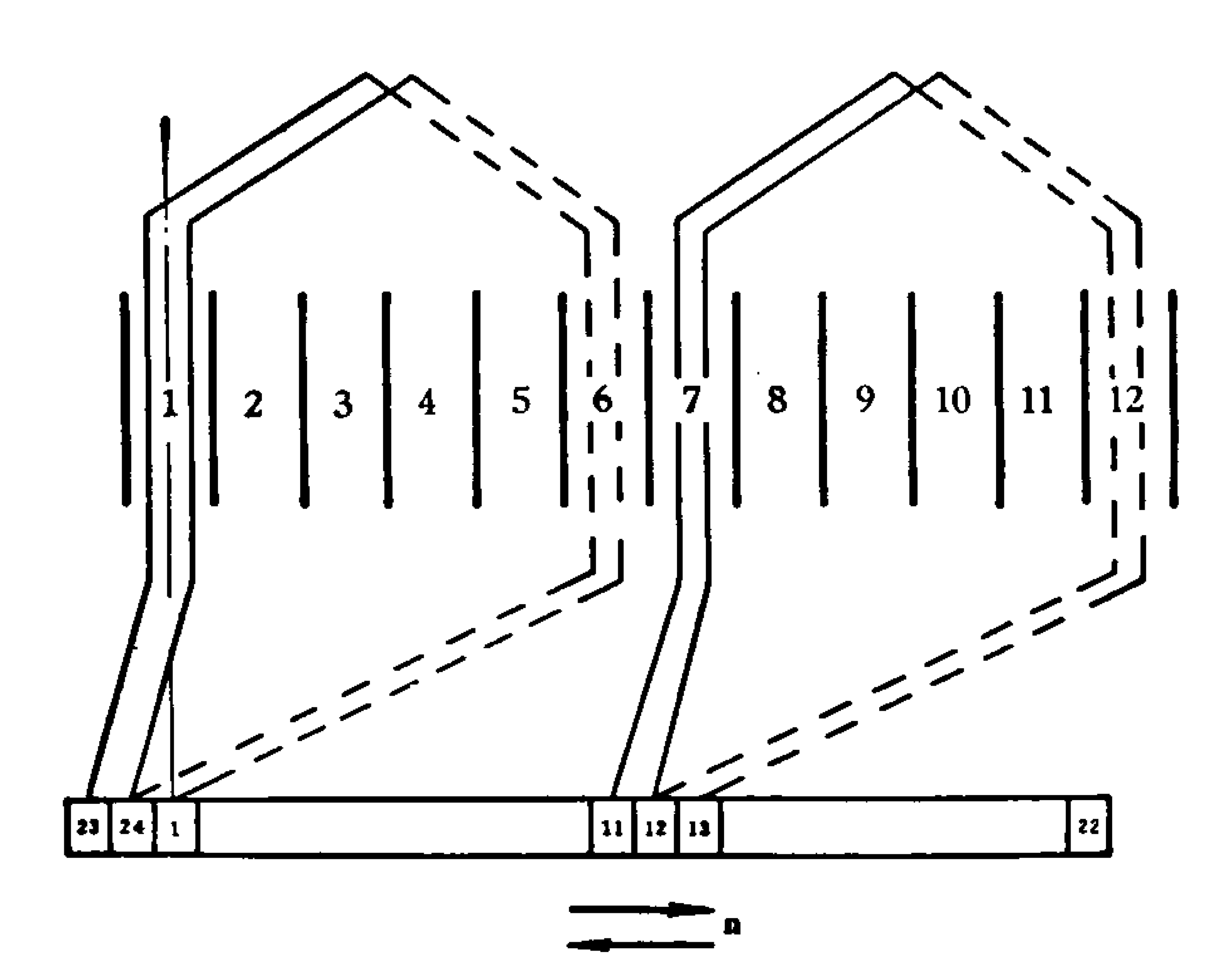
附图—13 U 15/40—220 U 15/56—220D



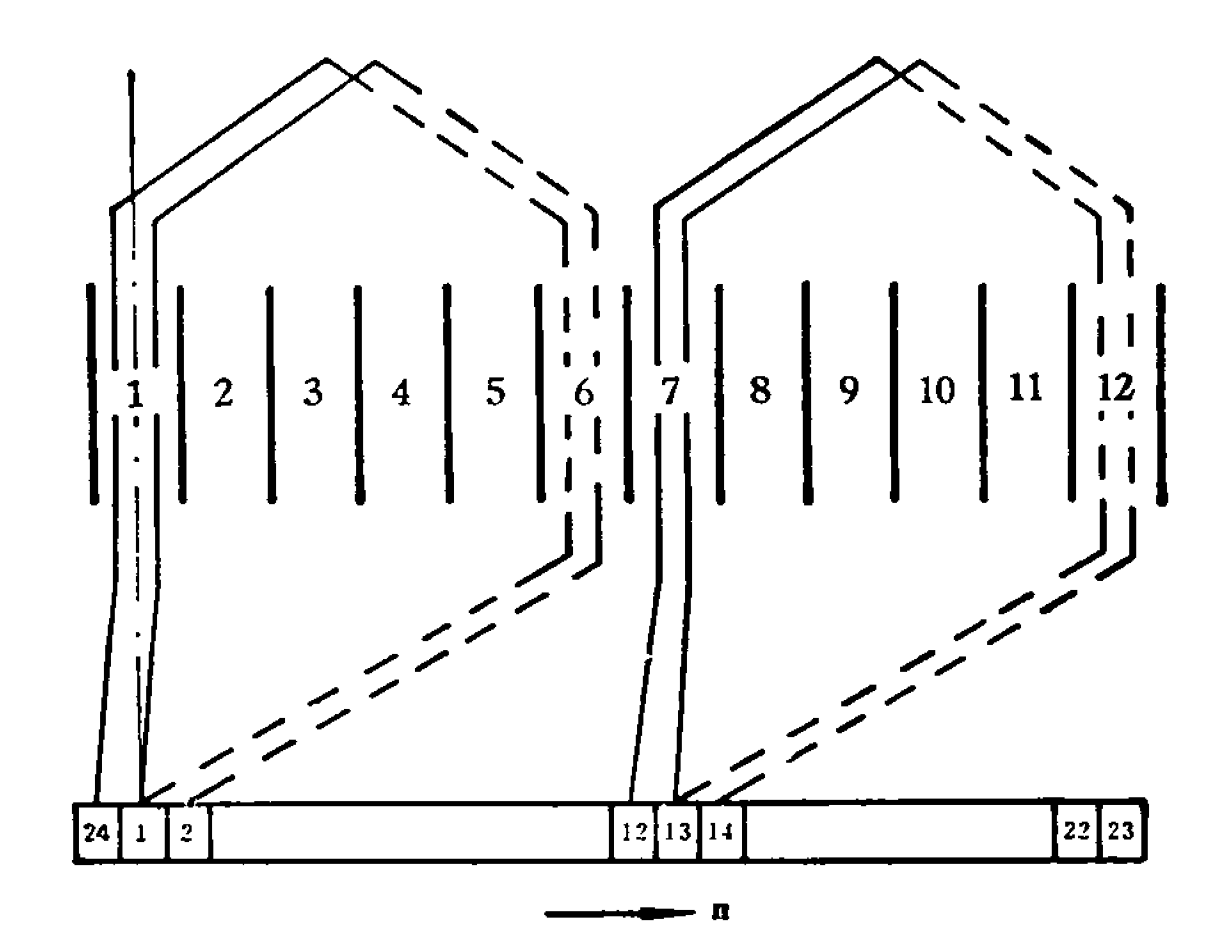
附图—14 U 30/40—220



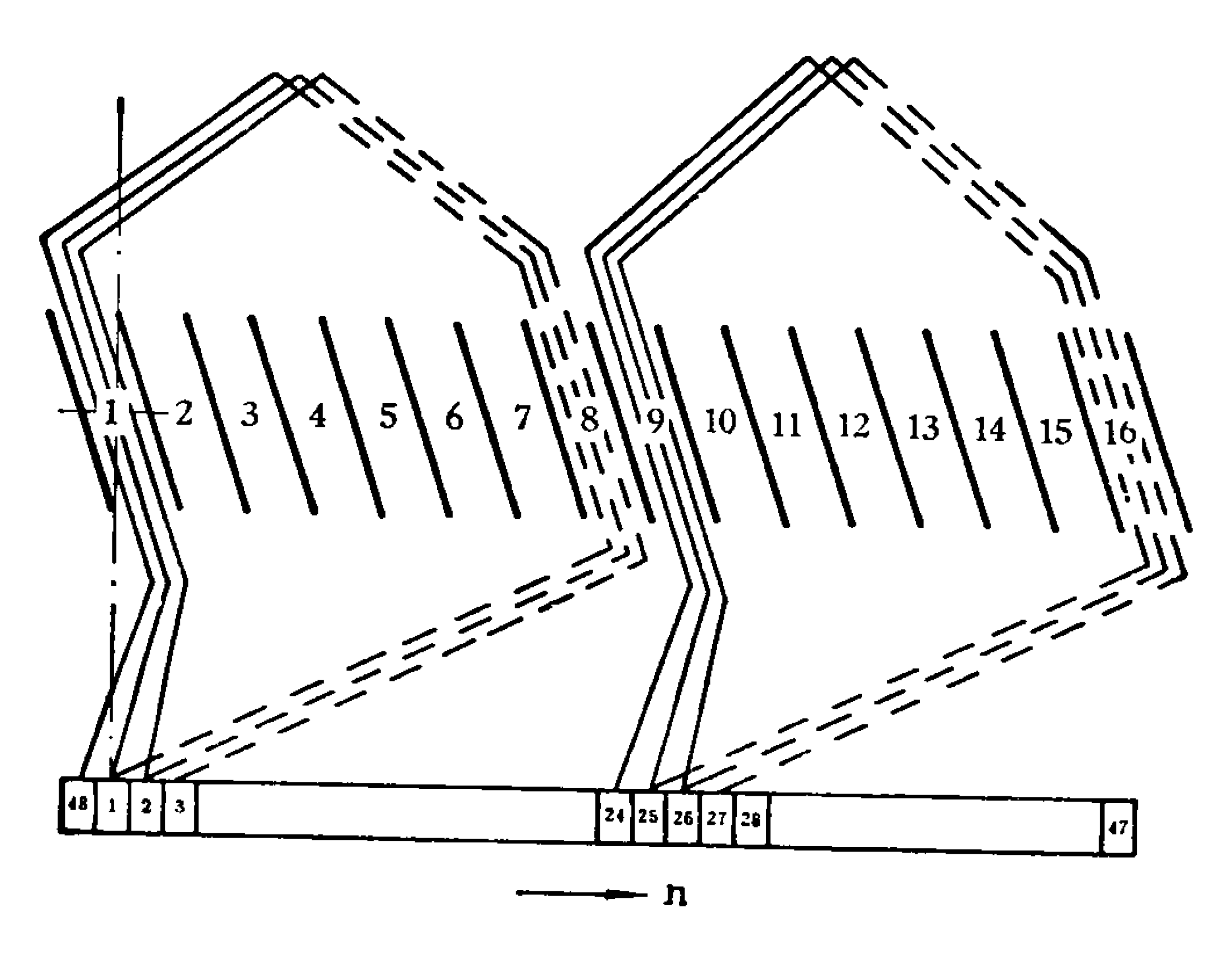
附图—15　U　80/50—110D　U　80/50—220D



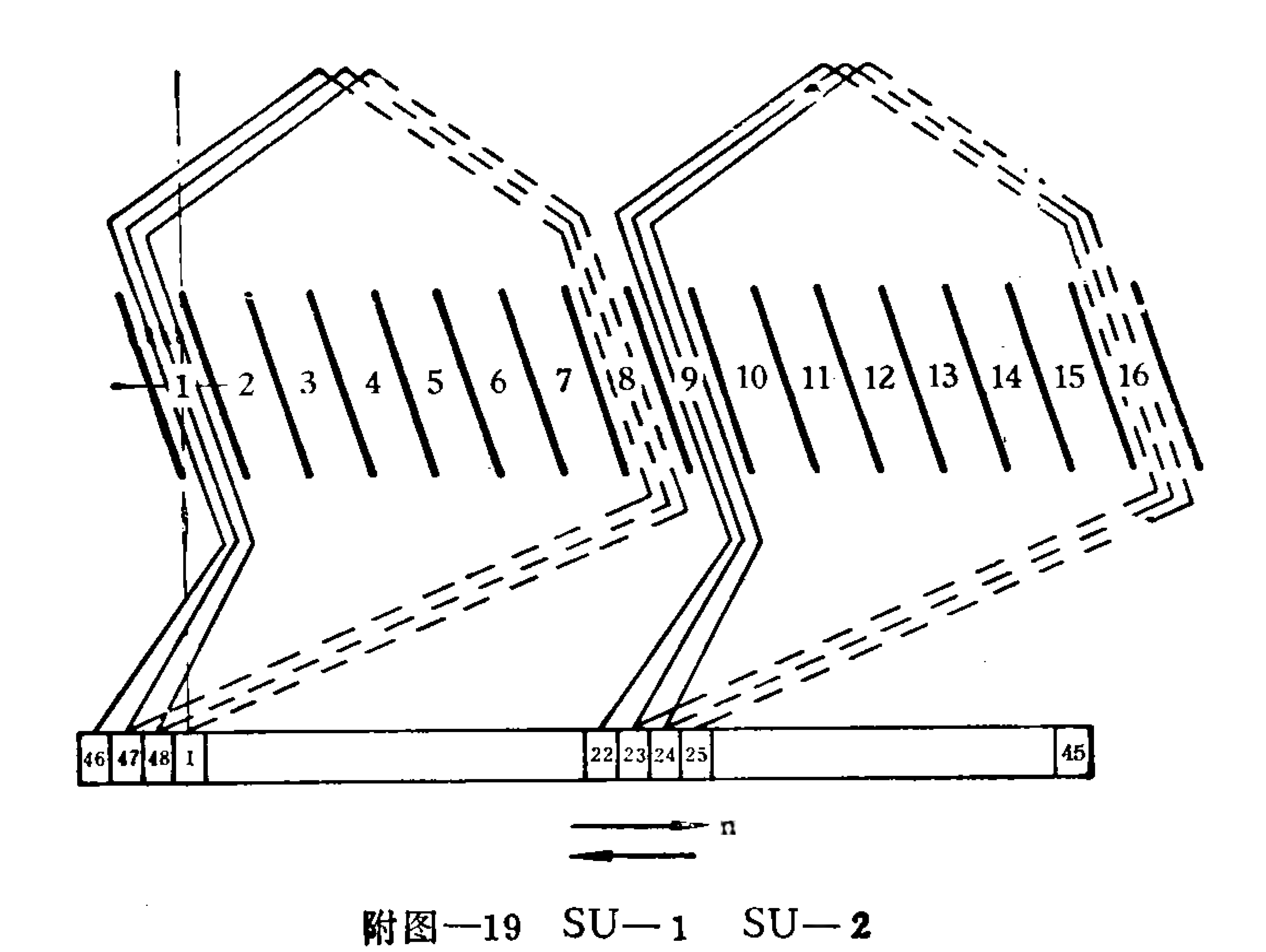
附图—16　U　40/36—24D　U40/36—110D



附图—17　U　55/45—220D



附图—18　U　120/40—220　U　180/40—220



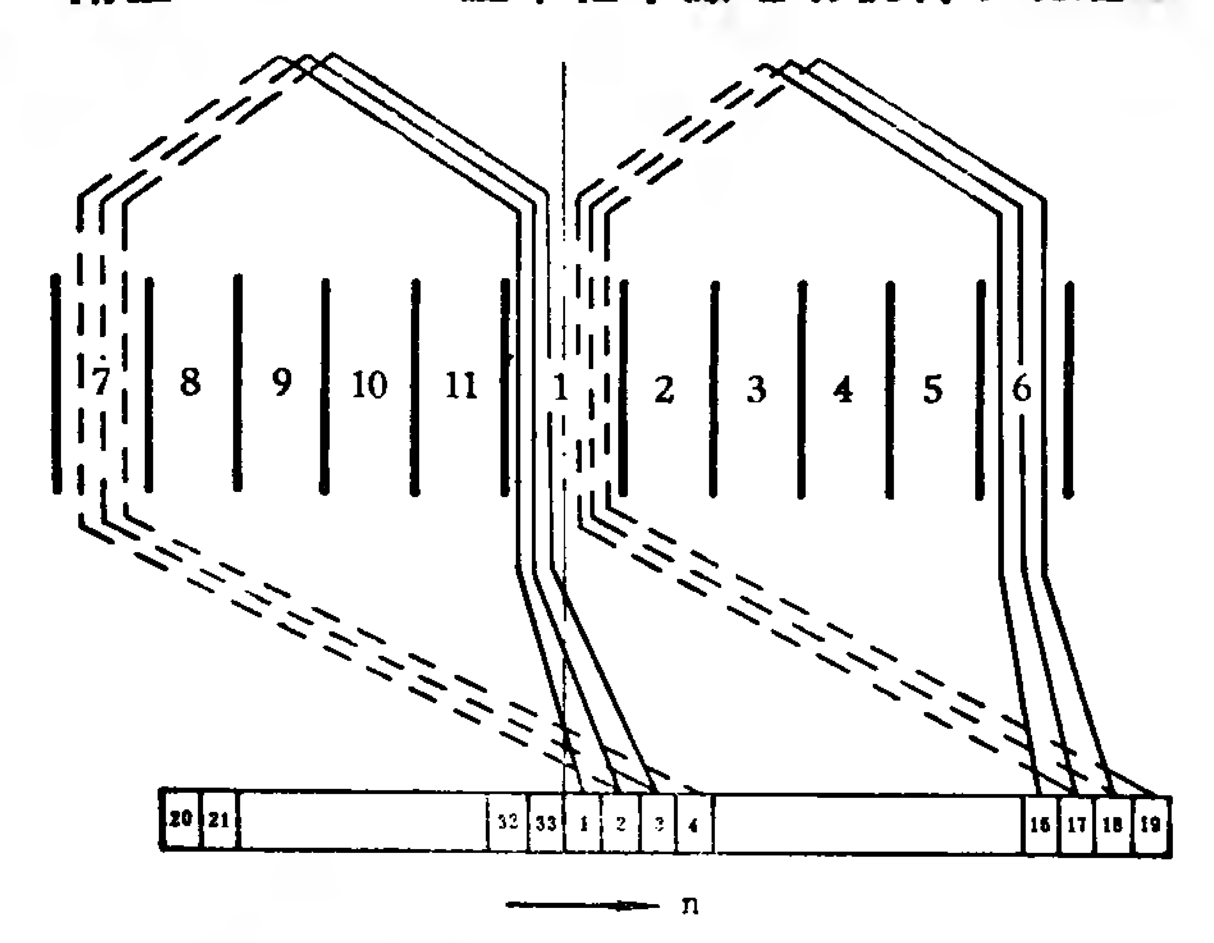
附图—19 SU—1 SU—2

附表—8

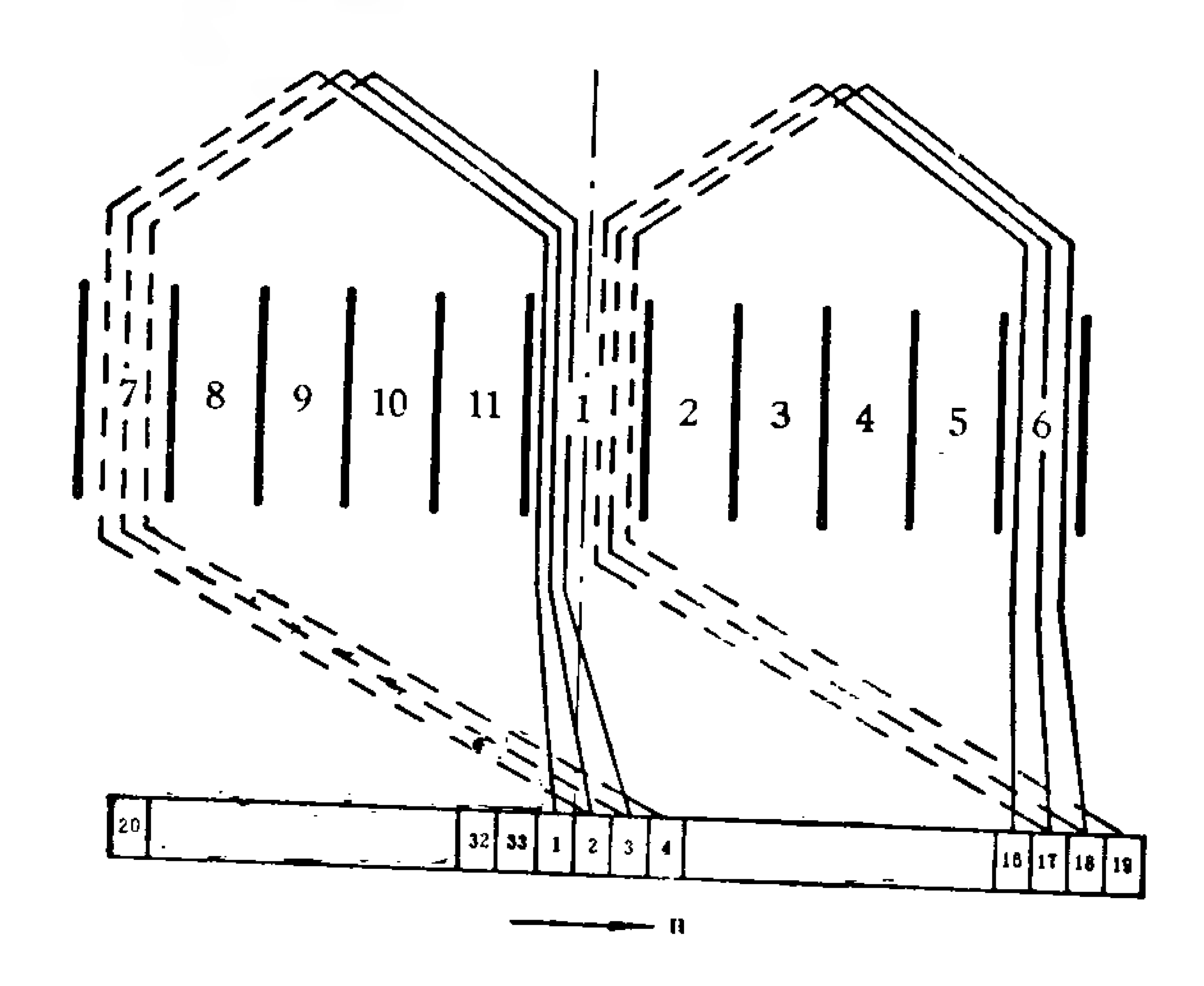
G型单相串激电动机技术数据

型号	性能		结构数据					绕组数据									
	输出功率(瓦)	转速(转/分)	定子外径(毫米)	定子内径(毫米)	铁心长度(毫米)	气隙长度(毫米)	转子槽数	定子每极匝数 W_1	转子每元件匝数	转子每槽导体数	转子总导体数 N	元件数或换向器片数	实槽节距	定子线规	转子线规	定匝转数子比 $\frac{4W_1}{N}$	转子绕组图形
G25/40	25	4000	71.3	39.3	20	0.4	11	690	84	504	5544	33	5	0.21	0.14	0.5	附图—20
G30/40	30	4000	71.3	39.3	25	0.4	11	486	74	444	4884	33	5	0.27	0.17	0.398	附图—20
G40/40	40	4000	71.3	39.3	25	0.4	11	486	76	456	5016	33	5	0.27	0.17	0.388	附图—2
G60/40	60	4000	71.3	39.3	36	0.4	11	358	53	318	3498	33	5	0.29	0.21	0.41	附图—21
G80/40	80	4000	71.3	39.3	44	0.4	11	310	46	276	3036	33	5	0.33	0.23	0.41	附图—22
G90/40	90	4000	71.3	39.3	53	0.4	11	286	39	234	2574	33	5	0.35	0.25	0.444	附图—22
G120/40	120	4000	90	51.3	40	0.45	19	282±2	37	148	2812	38	9	0.41	0.29	0.4	附图—23
G180/40	180	4000	90	51.3	55	0.45	19	182±2	29	116	2204	38	9	0.53	0.38	0.33	附图—24
G250/40	250	4000	90	51.3	68	0.45	19	146±2	18	72	1368	38	9	0.59	0.41	0.428	附图—25

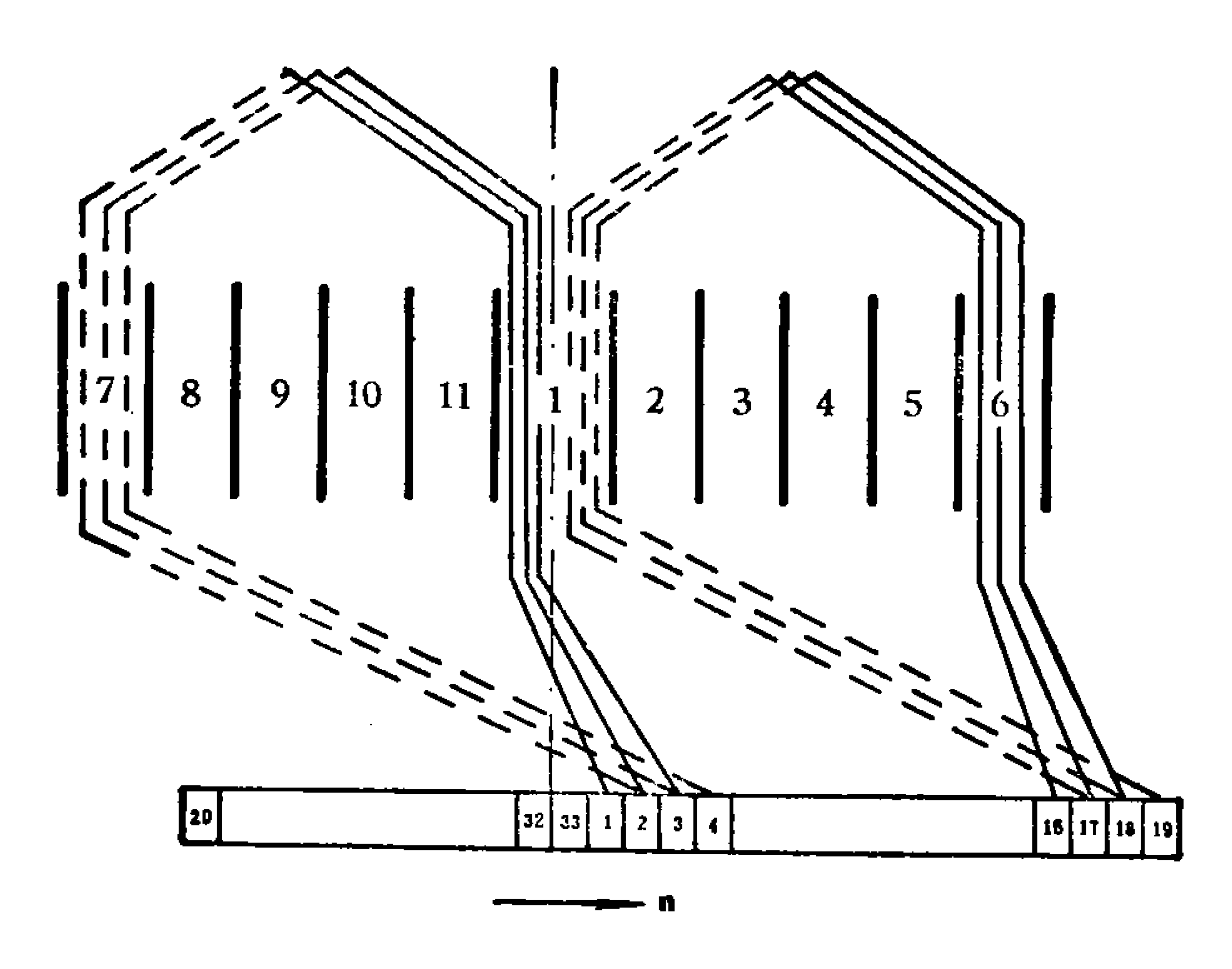
附图 20—25　G型单相串激电动机转子绕组图



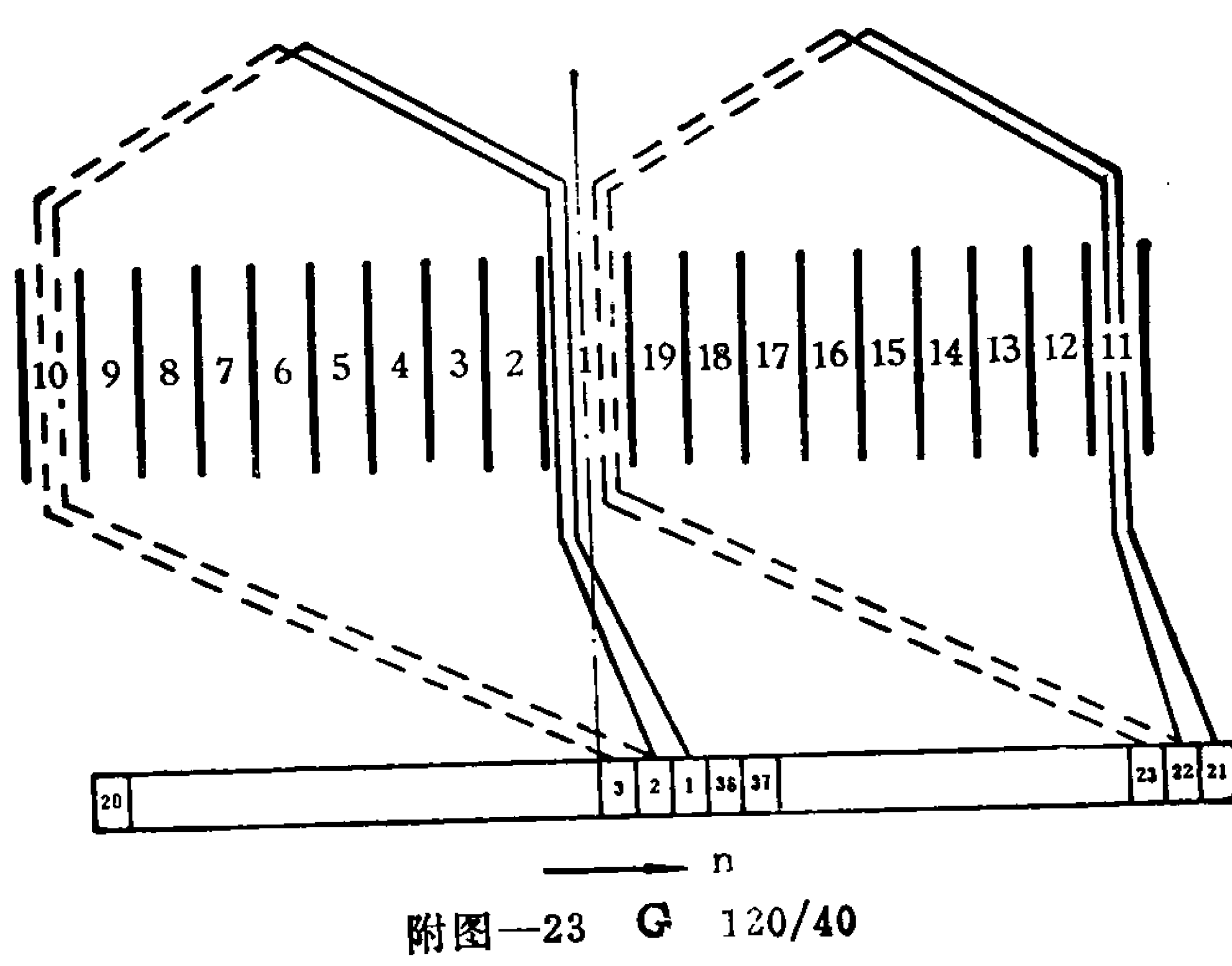
附图—20　G　25/40　G　30/40



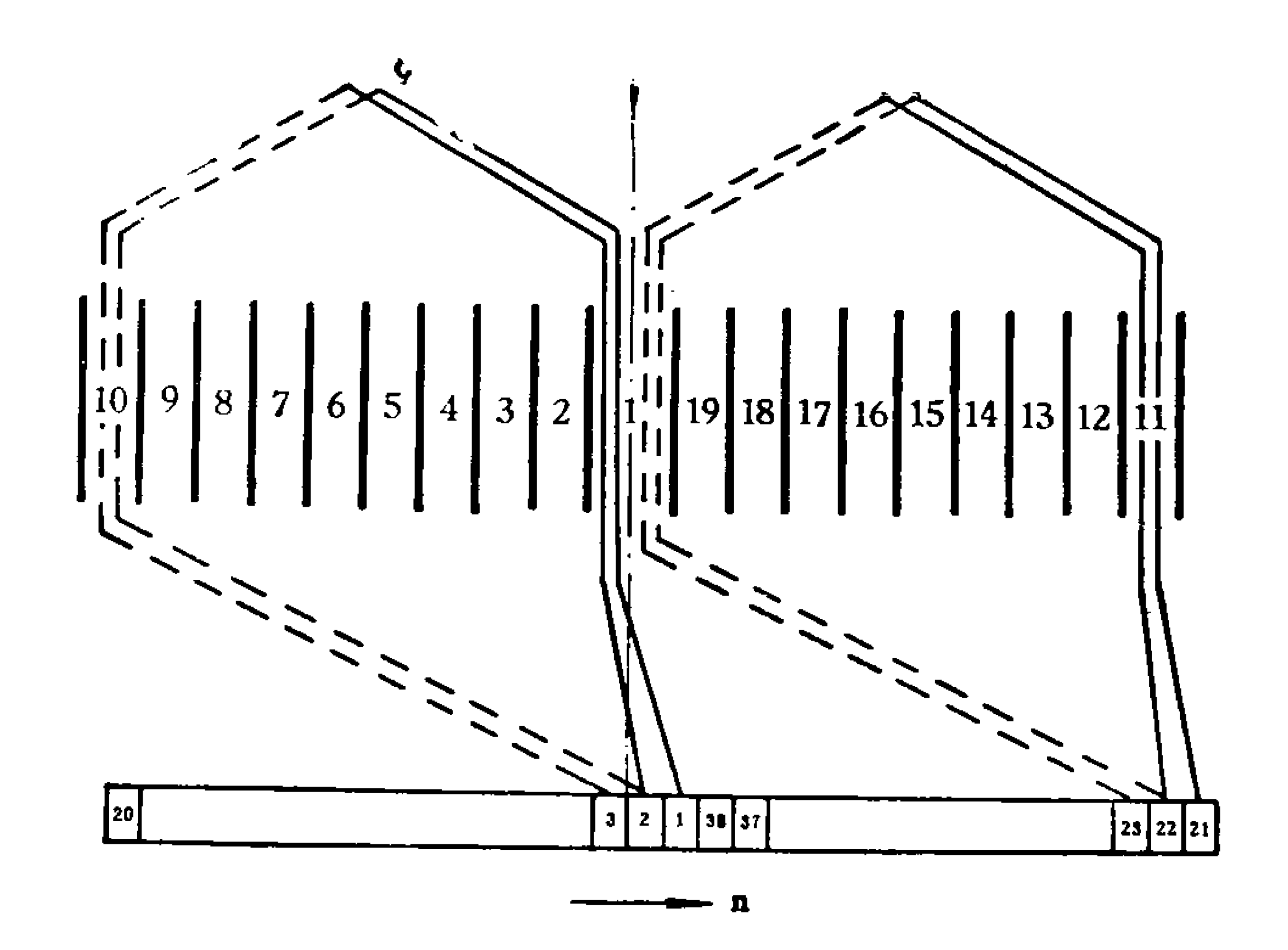
附图—21　G　40/40　G　60/40



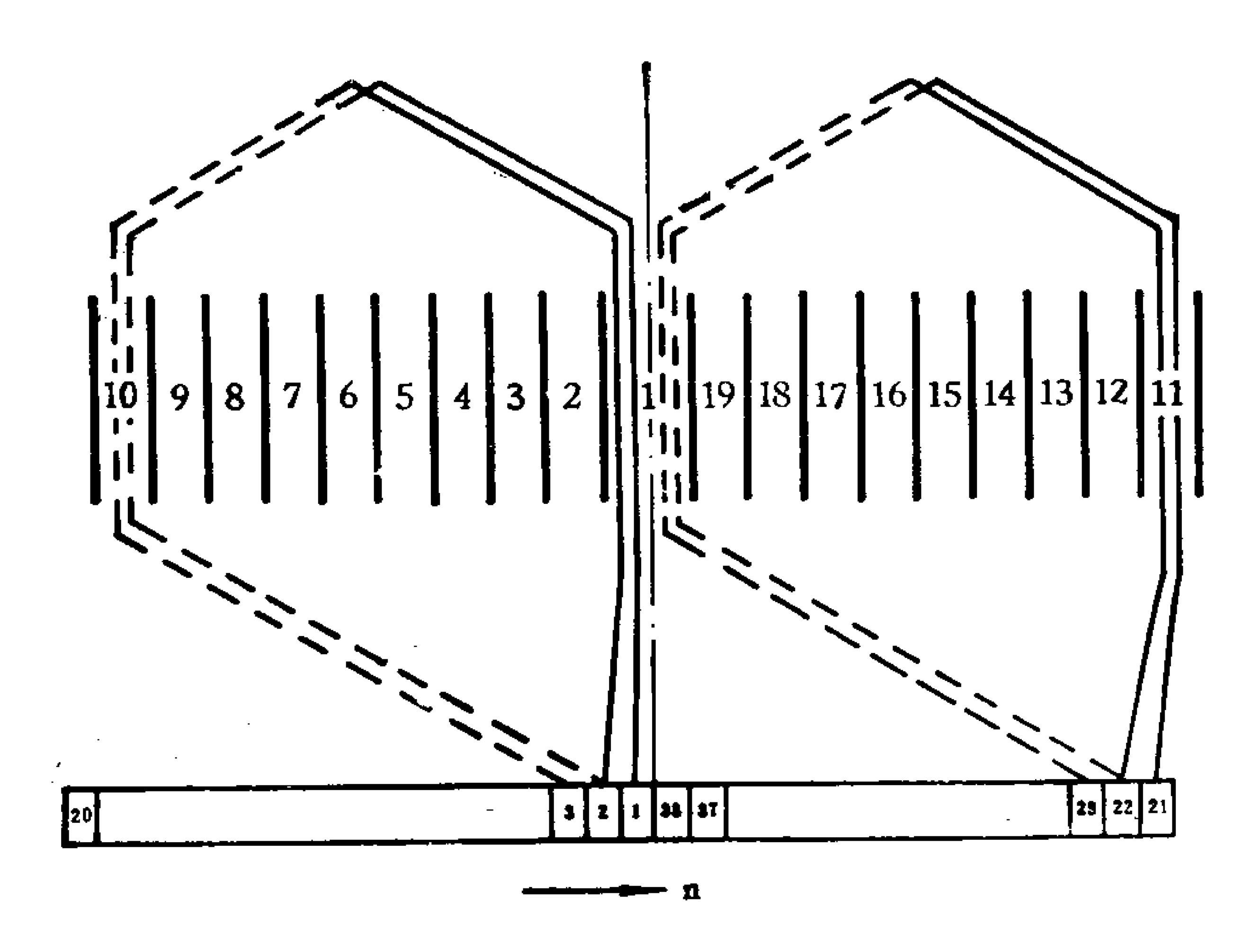
附图—22　G　80/40
G　90/40



附图—23　G　120/40



附图—24　G　180/40



附图—25　G　250/40

附表—9　G系列单相串激电动机主要性能

1. 功率与转速

机座代号	铁心长度代号	额定功率（瓦）			
		4000转/分	6000转/分	8000转/分	12000转/分
36	1	8	15	25	40
	2	15	25	40	60
	3	25	40	60	90
45	1	40	60	90	120
	2	60	90	120	180
	3	90	120	180	250
56	1	120	180	250	—
	2	180	250	370	—
	3	250	370	550	—
71	1	370	550	—	—
	2	550	750	—	—
	3	750	—	—	—

2. 效率η及功率因数cosφ

功 率 (瓦)	4000转/分		6000转/分		8000转/分		12000转/分	
	η	cosφ	η	cosφ	η	cosφ	η	cosφ
8	0.32	0.83	—	—	—	—	—	—
15	0.38	0.83	0.40	0.86	—	—	—	—
25	0.44	0.81	0.45	0.86	0.46	0.88	—	—
40	0.50	0.81	0.51	0.86	0.52	0.88	0.53	0.92
60	0.53	0.80	0.54	0.86	0.55	0.88	0.56	0.92
90	0.56	0.80	0.56	0.86	0.57	0.88	0.58	0.92
120	0.59	0.80	0.60	0.84	0.60	0.88	0.60	0.92
180	0.61	0.79	0.61	0.84	0.62	0.88	0.62	0.92
250	0.63	0.78	0.63	0.84	0.64	0.88	0.64	0.92
370	0.65	0.78	0.65	0.84	0.66	0.88	—	—
550	0.66	0.77	0.67	0.84	0.68	0.88	—	—
750	0.67	0.76	0.68	0.84	—	—	—	—

3. 起动转矩

<table>
<tr><th rowspan="2">功　率
(瓦)</th><th colspan="4">最初起动转矩/额定转矩</th></tr>
<tr><th>4000转/分</th><th>6000转/分</th><th>8000转/分</th><th>12000转/分</th></tr>
<tr><td>8</td><td rowspan="3">1.5</td><td></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>15</td><td rowspan="3">1.8</td></tr>
<tr><td>25</td><td rowspan="3">3.0</td></tr>
<tr><td>40</td><td rowspan="3">1.7</td><td rowspan="3">4.5</td></tr>
<tr><td>60</td><td rowspan="3">2.5</td></tr>
<tr><td>90</td><td rowspan="3">4.0</td></tr>
<tr><td>120</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">6.0</td></tr>
<tr><td>180</td><td rowspan="3">3.0</td></tr>
<tr><td>250</td><td rowspan="3">5.0</td></tr>
<tr><td>370</td><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>550</td><td rowspan="2">3.5</td></tr>
<tr><td>750</td><td></td></tr>
</table>

4. 起动电流

转　　速（转/分）	4000	6000	8000	12000
起动电流/额定电流	2.5	3.5	4.5	6.0

绕组数据								电磁负荷			
定子每极匝数	转子每元件匝数	转子总导体数	换向器片数	实槽节距	定子线规	转子线规	定转子匝数比	线负荷(安/厘米)	气隙磁密(高斯)	定子电密 (安/毫米²)	转子电密
1010	214	10272	24	3	0.14	0.09	0.393	69.5	3500	8.11	9.82
685	137	6576	24	3	0.18	0.12	0.417	74.1	3550	8.2	9.2
536	104	4992	24	3	0.23	0.15	0.431	87.5	3700	7.81	9.12
470	77	3696	24	3	0.25	0.17	0.51	83.6	3900	8.5	9.21
445	62	2976	24	3	0.29	0.20	0.6	90.1	4100	8.49	8.91
366	47	2256	24	3	0.33	0.23	0.65	94.5	4130	9.06	9.35
362	51	3672	36	5	0.31	0.21	0.394	94.5	4100	8.22	8.96
192	25	1800	36	5	0.44	0.31	0.425	97.1	4300	8.55	8.61
290	39	2808	36	5	0.38	0.25	0.413	106	4250	8.02	9.24
240	33	2376	36	5	0.41	0.27	0.405	100.8	4200	7.73	8.95
195	26	1872	36	5	0.44	0.31	0.417	105.8	4500	8.95	9.00
167	19	1368	36	5	0.51	0.38	0.489	102.2	4500	8.82	7.96
266	42	3276	39	6	0.44	0.29	0.325	121.8	4300	7.53	8.67
243	31	2418	39	6	0.49	0.33	0.402	118.5	4500	8.03	8.83
226	24	1872	39	6	0.55	0.38	0.483	118.5	4700	8.23	8.63
195	29	2262	39	6	0.53	0.35	0.344	125	4400	7.72	8.85
179	22	1716	39	6	0.57	0.41	0.417	114	4550	8.03	7.76
166	17	1326	39	6	0.64	0.47	0.15	121	4780	8.75	8.12
152	22	1716	39	6	0.59	0.41	0.354	128.7	4450	8.5	8.8
144	16	1248	39	6	0.67	0.47	0.462	122.2	4650	8.56	8.73
123	12	936	39	6	0.77	0.55	0.526	121.5	5200	8.7.	8.54
156	17	1938	57	9	0.69	0.49	0.322	148	5000	8.6	8.55
132	13	1482	57	9	0.77	0.55	0.356	144	5100	8.8	8.65
112	12	1368	57	9	0.83	0.59	0.328	153	5100	8.7	8.65
100	9	1026	57	9	0.93	0.64	0.39	133.7	5200	8.1	8.56

附表—10　　G系列单相串激

型号	主要性能				结构数据				
	功率(瓦)	电压(伏)	转速(转/分)	电流(安)	定子外径(毫米)	定子内径(毫米)	铁心长度(毫米)	气隙长度(毫米)	转子槽数
G3614	8	220	4000	0.125	56	30	18	0.3	8
G3624	15	220	4000	0.208	56	30	30	0.3	8
G3634	25	220	4000	0.324	56	30	38	0.3	8
G3636	40	220	6000	0.418	56	30	38	0.3	8
G3638	60	220	8000	0.52	56	30	38	0.3	8
G36312	90	220	12000	0.775	56	30	38	0.3	8
G4524	60	220	4000	0.62	71	39	40	0.35	12
G45212	180	220	12000	1.3	71	39	40	0.35	12
G4534	90	220	4000	0.907	71	39	50	0.35	12
G4536	120	220	6000	1.02	71	39	50	0.35	12
G4538	180	220	8000	1.36	71	39	50	0.35	12
G45312	250	220	12000	1.8	71	39	50	0.35	12
G5614	120	220	4000	1.145	90	50	35	0.5	13
G5616	180	220	6000	1.51	90	50	35	0.5	13
G5618	250	220	8000	1.95	90	50	35	0.5	13
G5624	180	220	4000	1.7	90	50	50	0.5	13
G5626	250	220	6000	2.05	90	50	50	0.5	13
G5628	370	220	8000	2.81	90	50	50	0.5	13
G5634	250	220	4000	2.32	90	50	65	0.5	13
G5636	370	220	6000	3.02	90	50	65	0.5	13
G5638	550	220	8000	4.05	90	50	65	0.5	13
G7114	370	220	4000	3.22	120	69	42	0.9	19
G7116	550	220	6000	4.1	120	69	42	0.9	19
G7124	550	220	4000	4.72	120	69	60	0.9	19
G7126	750	220	6000	5.5	120	69	60	0.9	19